



ESCOLA NAVAL

ta sãnto de biẽ-faire



Maria Helena Chagas dos Reis Bouças

**Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos –
Análise do modelo de Deriva do Instituto Hidrográfico**

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares
Navais, na especialidade de Marinha**



**Alfente
2017**



ESCOLA NAVAL

la sãntoe biefaire



Maria Helena Chagas dos Reis Bouças

Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos no mar – Análise do modelo de Deriva do Instituto Hidrográfico

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha

Orientação de: António José Duarte Costa Canas

Co-orientação de: Carlos Alberto dos Santos Fernandes

O aluno Mestrando

O Orientador

Maria Helena Bouças

António Costa Canas

Epígrafe

“Leave this world a little better than you found it.”

Robert Baden-Powell

Dedicatória

Aos meus pais e irmã, por estarem sempre a meu lado...

Obrigada.

Agradecimentos

Começo por agradecer ao meu orientador CMG Costa Canas e ao meu coorientador CFR Santos Fernandes, pelo apoio e disponibilidade demonstrada ao longo da elaboração da presente dissertação.

Agradeço ao Doutor Ilmer van Golde, à Doutora Catarina Clemente e ao 2TEN Martins Dias, pela ajuda e colaboração na investigação e obtenção de dados relativos ao modelo de deriva superficial do Instituto Hidrográfico, ao CMG EQM Pires Rodrigues, ao CFR EM-MEC Mota Duarte, à Engenheira Isabel Maria Tavares e à STEN Carina Tibúrcio pela colaboração e disponibilidade na investigação e no processo de desenvolvimento dos questionários aplicados.

Um agradecimento especial à 2TEN Deolinda Pedrosa, pela preciosa ajuda e disponibilidade no processo de elaboração e envio dos questionários.

Termino, agradecendo a minha família e amigos pelo amor, amizade, paciência e ensinamentos ao longo da minha vida.

A todos, muito obrigado.

Resumo

Os derrames de hidrocarbonetos no mar têm consequências devastadoras para os oceanos, os ecossistemas e para os estados costeiros afetados. Desde cedo, estados e organizações mundiais procuraram encontrar soluções que mitigassem os acidentes e os estragos causados por essas catástrofes.

Os sistemas operacionais de modelação de derrames de hidrocarbonetos no mar são uma ferramenta fundamental para a condução de operações de combate à poluição no mar, bem como para o estabelecimento de planos de contingência nacionais e internacionais. No entanto, o desenvolvimento destas ferramentas não é fácil e envolve um complexo processo de modelação. Uma mancha de hidrocarbonetos derramada no mar é afetada por diversos fatores como vento, a corrente e a agitação marítima, que contribuem para a sua movimentação e deriva, bem como para diversas alterações físicas e químicas no óleo derramado.

Em Portugal, o instituto Hidrográfico detém o programa de cálculo de deriva superficial utilizado no combate à poluição do mar. O modelo não foi originalmente desenvolvido para aplicação neste âmbito, portanto, apesar de ter sido melhorado aquando do afundamento do navio “Prestige”, o modelo não se encontra totalmente adaptados às necessidades de informação desta realidade.

Pretende-se, com a presente dissertação, enquadrar o modelo de previsão de deriva do Instituto Hidrográfico na realidade atual da modelação operacional de derrames de hidrocarbonetos. Para tal, foram estudadas e analisadas as várias etapas do processo de modelação, o estado da arte de modelos operacionais e identificadas as oportunidades de melhoria do modelo do Instituto Hidrográfico.

O estudo desenvolvido, constitui uma rampa de lançamento para o desenvolvimento e melhoramento do programa de deriva superficial do Instituto Hidrográfico, atendendo aos desenvolvimentos tecnológicos e científicos atuais e às necessidades dos coordenadores nacionais das ações de combate à poluição do mar por hidrocarbonetos.

Palavras-chave: derrames de hidrocarbonetos, modelação operacional, deriva, instituto hidrográfico

Abstract

Hydrocarbons spills in the ocean have devastating consequences for the oceans, the ecosystems and for the coastal areas affected. For a long time, countries and worldwide organizations have been trying to find solutions to mitigate these accidents and the damages caused by such catastrophes.

The operational systems of modelling oil spills in the ocean are a crucial instrument to lead combat operations to water pollution, as well as to establish contingency plans, on an international and international level. However, the development of such tools is not simple and it involves a complex modelling process.

An oil spill drift in the ocean can be affected by numerous factors such as the wind, currents, and water swells, which therefore contribute to its movement as well as to the way the spilled oil is changed on a physical and chemical level.

In Portugal, the Hydrographic Institute runs a program that can estimate the oil spill trajectory used for water pollution combat. This model hasn't been originally developed to be applied in such matters, consequently, and despite it has been improved when the ship "Prestige" has sunk, the model is not fully adapted to the information requirements for these type scenarios.

The aim of the present dissertation, is to compare the forecast model of spill drifting movements from the Hydrographic Institute with recent operational hydrocarbon spills models. Therefore, we have studied and analysed the distinct stages of the modelling process, the state of the art operational models and have identified areas of possible development of the current model used by the Hydrographic Institute.

The study developed, is a kick-start point to the development and improvement of the Hydrographic Institute oil spill drift forecast program, considering the latest technological and scientific developments and the requirements of the national coordinating actions towards sea water pollution fighting, in particular pollution by hydrocarbons.

Key-words: oil spill, operational modulation, drift, hydrographic institute

Índice de figuras

Ilustração 1 - Principais rotas marítimas mundiais [Fonte: <i>Marine Traffic</i> , 2017]..	26
Ilustração 2 – Escoamento de águas provenientes de terrenos agrícolas a fluir para o mar, transportando pesticidas e fertilizantes. Florida, EUA. 31 de julho de 2009 [Fonte: NOAA's National ocean Service, s.d.]	28
Ilustração 3 - <i>Worldwide primary energy supply in 2014, by source</i> [Fonte: IEA, 2016]	29
Ilustração 4 – Imagens representativas das consequências de derrames de hidrocarbonetos em zonas costeiras. [Fonte: Azevedo, 2010]	30
Ilustração 5 - Níveis de Articulação do PML [Fonte: AMN, 2017]	31
Ilustração 6 - Organograma do procedimento de resposta a incidente do PML.....	33
Ilustração 7 - Esquema dos processos reológicos que ocorrem durante um derrame de hidrocarbonetos [Fonte: Azevedo, 2010].....	44
Ilustração 8 - Esquema dos períodos de atuação e grau de relevância dos processos reológicos que ocorrem durante um derrame de hidrocarbonetos [Fonte: Azevedo, 2010].	45
Ilustração 9 - Representação esquemática do processo de espalhamento [Fonte: Azevedo, 2010]	46
Ilustração 10 – Representação esquemática do processo de evaporação [Fonte: Azevedo, 2010]	47
Ilustração 11 - Curvas representativas das taxas de evaporação de alguns óleos [Fonte: Fingas, 2015].....	48
Ilustração 12 - Aspeto de uma emulsão de um HC em água [Fonte: DGAM, 2011] .	49
Ilustração 13 - Exemplo apresentação de resultados – Modelo OILMAP [Fonte: RPS ASA, s. d.].....	60
Ilustração 14 – Exemplo apresentação de resultados – Modelo OSCAR [Fonte: SINTEF, 2014].....	61
Ilustração 15 - Exemplo apresentação de resultados – Plataforma MARPOCS [Fonte: MARPOCS, 2017]	63

Ilustração 16 - Exemplo apresentação de resultados, com tabela de propriedades do óleo – Plataforma MARPOCS [Fonte: MARPOCS, 2017]	64
Ilustração 17 - Afundamento do navio mercante "Prestige", em 05/07/2017 [Fonte: Wordpress, 2015]	66
Ilustração 18 - Centro de Coordenação de Busca e Salvamento Marítimo de Lisboa (em cima) e área das Regiões de Busca e Salvamento Nacionais – SRR Lisboa e SRR Santa Maria (em baixo) [Fonte: Marinha, 2017]	67
Ilustração 19 – Ficheiros obtidos do processamento dos dados meteorológicos para o cálculo da Deriva (em cima: Posição do acidente, à esquerda: Intensidade e Direção do vento nas SRR Portuguesas, à direita: Ficheiro de compilação de dados de vento para cálculo da deriva) 69	
Ilustração 20 - Processo de preenchimento dos campos do Modelo de Deriva do IH (à esquerda: Interface inicial do Modelo; à direita: Interface de introdução de dados (campos por preencher), em baixo: Interface de introdução de dados (com campos preenchidos)	70
Ilustração 21 – Apresentação dos resultados do cálculo da deriva do modelo DERIVA, em formato imagem	71
Ilustração 22 – Apresentação dos resultados do cálculo da deriva do modelo DERIVA, em formato documento de texto (.txt)	71
Ilustração 23 - Esquema da Espiral de Ekman [Fonte: THURMAN, 2004]	73
Ilustração 24 - Apresentação de resultados plataforma MARPOCS [Fonte: MARPOCS, 2017]	78
Ilustração 25 - Exemplos de Apresentação de Resultados dos modelos estudados (lado esquerdo, em cima: modelo OILMAP; lado esquerdo em baixo: plataforma MARPOCS; lado direito: modelo OSCAR)	79
Ilustração 26 - Apresentação dos Resultados do modelo DERIVA (lado esquerdo: imagem, lado direito: documento de texto)	80
Ilustração 27 - Importância do cálculo da previsão de deriva de uma mancha	81
Ilustração 28 – Classificação da informação disponibilizada pelo modelo do IH	81
Ilustração 29 - Classificação do formato da informação disponibilizada pelo modelo do IH	82

Ilustração 30 – Tipos de informação a disponibilizar no modelo do IH	83
--	----

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Níveis de articulação do PML [Fonte: AMN, 2017].....	32
Tabela 2 – Esquema comparativo dos modelos estudados.....	80

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

AMN	Autoridade Marítima Nacional
API	<i>American Petroleum Institute</i>
APRAM	Administração de Portos da Região Autónoma da Madeira
ASA	<i>Applied Science Associates</i>
CEMA	Chefe do Estado-Maior da Armada
CMEMS	<i>Copernicus Marine Environment Monitoring Service</i>
DGAM	Direção-Geral da Autoridade Marítima
DL	Decreto-Lei
DO	Divisão de Oceanografia
EMSA	<i>European Maritime Safety Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
GDH	Grupo-Data-Hora
HC	Hidrocarbonetos
HF	<i>High Frequency</i>
HNC	<i>Hazardous and noxious substances</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IH	Instituto Hidrográfico
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera

IST	Instituto superior Técnico
MARPOCS	<i>Multinational Response and Preparedness to Oil and Chemical Spills</i>
MP	Marinha Portuguesa
MARPOL	<i>Maritime Pollution</i>
MATLAB	<i>MathWorks</i>
MRCC	<i>Maritime Rescue Coordination Center</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OSCAR	<i>Oil Spill Contingency And Response</i>
PML	Plano Mar Limpo
SAR	<i>Search and Rescue</i>
SCPM	Serviço do Combate à Poluição do Mar
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
UNCLOS	<i>United Nations Convention on the Law of the Sea</i>
ZEE	Zona Económica Exclusiva

Índice

Epígrafe	v
Dedicatória	vii
Agradecimentos	ix
Resumo	xi
Abstract	xiii
Índice de figuras	xv
Índice de Tabelas	xix
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos	xxi
Índice	23
Capítulo 1 – Introdução	25
1.1 Enquadramento	27
1.2 Justificação do Tema	34
1.3 Objetivos	34
1.4 Questões de investigação.....	35
1.5 Estrutura da dissertação	36
Capítulo 2 – Os hidrocarbonetos e as suas problemáticas	37
2.1 Propriedades dos hidrocarbonetos.....	37
2.1.1 Características dos Hidrocarbonetos.....	38
2.1.2 Categorização de Hidrocarbonetos	41
2.2 Processos de transformação dos hidrocarbonetos após derrames	43
2.2.1 Deriva (<i>drifting</i>)	45
2.2.2 Espalhamento (<i>spreading</i>)	46
2.2.3 Evaporação (<i>evaporation</i>)	47
2.2.4 Emulsificação (<i>water-in-oil emulsion</i>)	49

2.2.5	Outros processos	50
Capítulo 3 – Modelação de derrames de hidrocarbonetos		53
3.1	Modelação Operacional	53
3.2	Integração dos processos de transformação do óleo	54
3.2.1	Deriva	54
3.2.2	Espalhamento	55
3.2.3	Evaporação.....	57
3.3	Ferramentas de modelação de hidrocarbonetos.....	57
3.3.1	Modelo OILMAP	59
3.3.2	Modelo OSCAR.....	61
3.3.3	Plataforma MARPOCS.....	62
Capítulo 4 – Análise do Modelo de Deriva do Instituto Hidrográfico		65
4.1	Origem do modelo DERIVA.....	65
4.2	Âmbito do Modelo.....	67
4.3	Aplicação do Modelo	68
4.4	Metodologia do Modelo	72
4.5	Comparação com outros modelos.....	74
4.6	Opinião dos utilizadores do modelo do IH	80
Capítulo 5 – Discussão de Resultados		85
5.1	Resultados da Análise do modelo de deriva do IH	85
5.2	Sugestões de melhoria do Modelo de Deriva do IH	86
Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações		89
6.1	Análise sumária do trabalho realizado e trabalhos futuros	89
Bibliografia		93
Anexos		98
Anexo I – Versão original guardada em pdf.		Erro! Marcador não definido.

Capítulo 1 – Introdução

Portugal encontra-se numa posição geográfica privilegiada e estrategicamente valiosa. Apesar de não se destacar no cume dos países da Europa com maior área geográfica¹, dispõe de uma área marítima sob jurisdição nacional dezoito vezes superior ao território nacional (Cunha, 2004). Aspeto muitas vezes aludido com o orgulho e a vaidade próprios sem, no entanto, apreciar os deveres e as responsabilidades que esta vasta área marítima acarreta para o país, para o Estado, para a Marinha Portuguesa (MP) e para a Autoridade Marítima Nacional (AMN).

A Direcção-Geral da Autoridade Marítima (DGAM) afirma que, durante a extração e o transporte por mar, estima-se que sejam introduzidos nos oceanos, por ação humana, voluntária ou involuntária, aproximadamente 5 milhões de toneladas de HC por ano, o que representa uma das principais causas de poluição dos oceanos (DGAM, 2011).

A quantidade de HC transportada diariamente nos mares e oceanos é incomensurável, apresentando um risco igualmente devastador de cada vez que existe uma ocorrência ou catástrofe neste sector. Ao longo da História foram vários os casos em que acidentes com grandes derrames de HC provocaram, nos quatro cantos do mundo e ao longo de centenas de quilómetros de costa, grandes devastações, morte de inúmeros seres vivos e destruição de ecossistemas.

Ficou claro, na Resolução do Conselho de Ministros nº 25/93, que “o elevado fluxo de tráfego de navios que atravessam diariamente a zona económica exclusiva (ZEE) portuguesa determina um risco acrescido de acidentes com consequências nefastas sobre essa zona e o meio marinho em geral, bem como sobre todo o litoral” (Ilustração 1). Na mesma Resolução onde se aprovou o Plano Mar Limpo (PML), o “Plano de Emergência para o Combate à Poluição das Águas Marinhas, Portos, Estuários e Trechos Navegáveis dos Rios, por Hidrocarbonetos e Outras Substâncias Perigosas”.

Na possibilidade de ocorrência de incidentes com derrame de hidrocarbonetos, e uma vez que é do interesse do país proteger as suas águas de

¹ Portugal tem uma área geográfica de 92 226 Km², é o vigésimo primeiro país com maior área da Europa. (Fonte: Eurostat, Institutos Nacionais de Estatística. Atualizado em 12-9-2016)

tais calamidades, o primordial é que esteja preparado para agir pronta e devidamente.

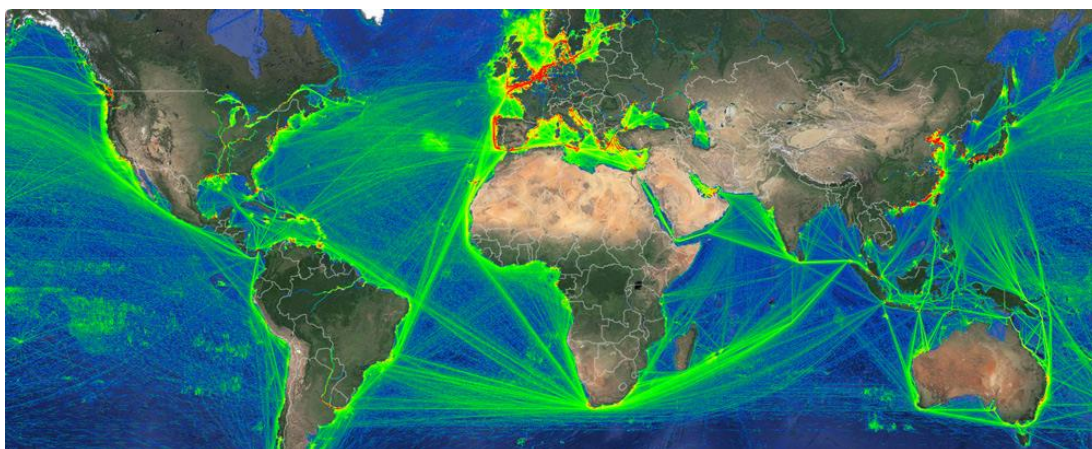


Ilustração 1 - Principais rotas marítimas mundiais [Fonte: *Marine Traffic*, 2017]

A modelação de derrames de HC é um processo complexo, dependente de várias variáveis. Este tipo de modelação procura a previsão de comportamento e deriva das manchas de óleo derramado, fundamental para análises de risco e para apoio na tomada de decisão em ações de combate à poluição no mar.

A presente dissertação pretende incidir na temática da poluição por HC, em particular, na análise do modelo de cálculo de deriva superficial do Instituto Hidrográfico (IH), no âmbito da sua aplicação na modelação operacional de derrames de HC no mar.

Este capítulo encontra-se dividido em cinco partes distintas. Na primeira é feito o enquadramento do tema em estudo, abordando a temática da poluição do mar, as causas de poluição do mar, o SCPM, o PML e o papel do cálculo da deriva do IH. Ainda, neste capítulo, são definidos os objetivos a atingir e apresentadas as questões de investigação, a justificação do tema e a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento

A espécie humana evoluiu bastante ao longo dos tempos, e continua a evoluir. Porém, todo este desenvolvimento e evolução conduziram a uma longa listagem de danos provocados no nosso planeta.

“The introduction by man, directly or indirectly, of substances or energy into the marine environment, including estuaries, which results or is likely to result in such deleterious as harm to living resources and marine life, hazards to human health, hindrance to marine activities, including fishing and other legitimate uses of the sea, impairment of quality for use of sea water and reduction of amenities.”

(United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS),
Resolução da Assembleia da República (RAR) nº 60-B/97)

Esta foi a definição encontrada para o significado de poluição do meio marinho, na UNCLOS², em 1982. Existem vários tipos e origens de poluição do mar e, como citado, esta pode decorrer de forma direta ou indireta. Na verdade, cerca de 80% da poluição marítima é proveniente de terra. Sobretudo resultante do escoamento de águas sujas para os oceanos, consequentes de chuvas fortes e tempestades. Esta é uma fonte de poluição proveniente de inúmeros agentes desde resíduos habitacionais, despejos urbanos, terrenos altamente fertilizados, viaturas, embarcações, entre muitos outros, que direta ou indiretamente contribui para a poluição do mar. Todos os dias, milhões de veículos libertam dos seus motores pequenas quantidades de petróleo que se acumulam no solo por todas as estradas e estacionamento por onde circulam. Os fertilizantes e pesticidas utilizados na agricultura são outro exemplo de acumulação de resíduos poluentes no solo. Em algumas áreas esta forma de poluição, combinada com os restantes agentes poluidores indiretos, é tão prejudicial que algumas praias são fechadas após

²A Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, de 10 de dezembro de 1982, assinada por Portugal na mesma data, foi motivada pela necessidade de solucionar todas as questões relacionadas com o direito do mar.

períodos de chuvas fortes e tempestades (Ilustração 2) (*National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), s.d.).



Ilustração 2 – Escoamento de águas provenientes de terrenos agrícolas a fluir para o mar, transportando pesticidas e fertilizantes. Florida, EUA. 31 de julho de 2009 [Fonte: NOAA's National ocean Service, s.d.]

Nas costas portuguesas, as fontes de poluição do mar são sobretudo navios e, com menor significado, instalações costeiras. São exemplo de outras causas frequentes de poluição do mar (DGAM, 2011):

- Sinistros marítimos, tais como encalhes, afundamentos, explosões, rombos e colisões entre navios que transportem HC, como carga ou combustível próprio;
- Descarga de águas oleosas de porões, de lavagem de tanques de carga e lastro de navios;
- Derrames em operações de trasfega entre navios, e através de embarcações;
- Efluentes industriais e urbanos (origem telúrica);
- Derrames de campos de exploração petrolífera situados no mar (plataformas offshore);
- Precipitação de HC que se evaporam para a atmosfera;
- Modificação no regime dos rios e nas cargas poluentes por eles transportadas.

A consciencialização ambiental, em parceria com os desenvolvimentos tecnológicos, veio valorizar e despoletar o interesse por energias alternativas ao tradicional carvão e petróleo, surgindo a cada dia novas ideias e projetos privilegiando o recurso a energias alternativas. O consumo de petróleo, desde 1973 diminuiu de 46% para 31% em 2014, ainda assim, o petróleo encontrava-se no topo das fontes de energia primárias (31.3%), seguido do carvão (28.6%) e do gás natural (21.2%) (Ilustração 3) (IEA, 2016).

Como mencionado, os HC representam uma elevada percentagem de todas as fontes de energia consumidas atualmente, e são extraídos e transportados recorrendo essencialmente à via marítima. Atualmente, existem centenas de plataformas offshore em todo o planeta. A região com o maior número de plataformas é o golfo do México onde, em 2015, existiam mais de 200 plataformas, seguido do Mar do Norte com 184 e do Sudeste Asiático com 173 plataformas a efetuarem recolha de crude³ e gás natural (IEA, 2016).

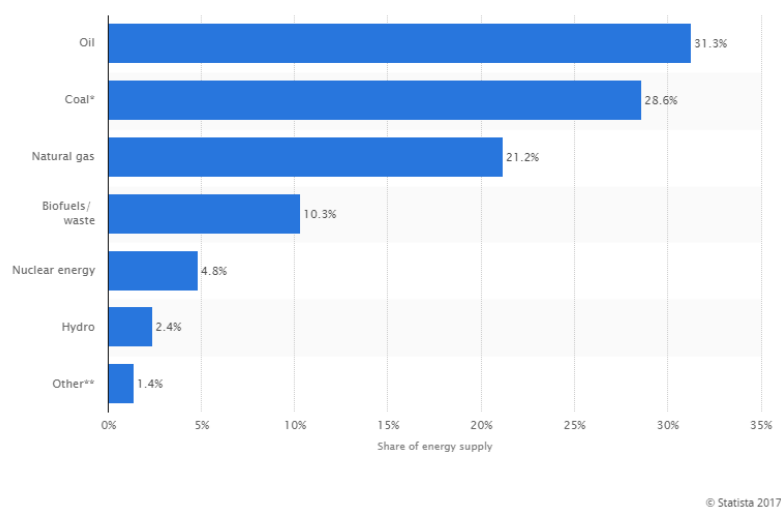


Ilustração 3 - Worldwide primary energy supply in 2014, by source [Fonte: IEA, 2016]

Sempre que abordada a temática da poluição marítima, o assunto rapidamente embate na problemática da poluição por hidrocarbonetos (HC) e culmina com referências a acidentes ou episódios envolvendo grandes derrames de HC, pois são estes que são sucedidos de devastadoras imagens de manchas de óleo a cobrir

³ Crude é a designação para o petróleo no estado bruto.

praias, a destruir ecossistemas e a matar animais marinhos, marcando a memória de milhares de pessoas (Ilustração 4). Para além disso, após acontecimentos como estes decorrem longos períodos de limpeza e longos processos de reabilitação para as praias e costas afetadas, bem como o restabelecimento dos ecossistemas existentes, causando enormes transtornos às populações, às economias locais e aos Estados envolvidos.



Ilustração 4 – Imagens representativas das consequências de derrames de hidrocarbonetos em zonas costeiras. [Fonte: Azevedo, 2010]

A ocorrência de derrames de petróleo sucedidos no passado, em acumulação com as trágicas consequências no ambiente impulsionaram a investigação na área de modelação de derrames de HC. As ferramentas de modelação de derrames de HC têm um grande impacto na otimização de planos de contingência e na mitigação dos efeitos destes acidentes (Azevedo, 2015).

Em 2015, foram reportados 81 incidentes de poluição e intervencionados 5 incidentes. Em 2016, pelo sistema “*CleanSeaNet*” da Agência Europeia da Segurança Marítima (EMSA) foram detetadas 111 potenciais manchas de poluição nos espaços marítimos sob jurisdição nacional, sendo que cerca de 88% das presumíveis manchas de poluição apresentavam dimensão estimada inferior a 20 Km². Foram registados 17 incidentes de poluição, dos quais resultaram 6 operações conjuntas de combate à poluição, efetuados pelos órgãos da Autoridade Marítima Nacional em coordenação com as respetivas Administrações Portuárias, quando nas respetivas áreas de jurisdição (SCPM, 2017).

O Serviço de Combate à Poluição do Mar (SCPM), é um organismo da DGAM, ao qual compete a direção técnica nacional em matéria de prevenção e combate à poluição do mar, nos espaços sob jurisdição da AMN. O SCPM tem como missão estabelecer, a nível nacional, os procedimentos de natureza técnica relativos à vigilância e ao combate à poluição do mar, bem como coordenar e dirigir operações de combate à poluição do mar.

O PML é, como referido anteriormente, o “Plano de Emergência para o Combate à Poluição das Águas Marinhas, Portos, Estuários e Trechos Navegáveis dos Rios, por Hidrocarbonetos e Outras Substâncias Perigosas” e foi aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros nº 25/93, de 15 de abril. O PML tem como objetivo (AMN, 2017):

- Estabelecer um dispositivo de resposta;
- Definir responsabilidades e fixar competências dos diversos organismos intervenientes;
- Definir mecanismos de mobilização, de ajuda e de apoio técnico;
- Definir estratégias, métodos e técnicas de combate ao incidente;
- Definir esquemas de formação e treino do pessoal envolvido na direção e coordenação das operações;
- Definir o estabelecimento de bases logísticas (operacionais).

A estrutura nacional para a Prevenção e Combate à Poluição encontra-se articulada segundo três níveis de articulação (AMN, 2017):



Ilustração 5 - Níveis de Articulação do PML [Fonte: AMN, 2017]

A entidade coordenadora, é determinada em função do grau de prontidão adotado no âmbito do PML, e tem a função de estabelecer o plano de intervenção aplicável, o conceito da operação e as entidades intervenientes (AMN, 2017):

Tabela 1 - Níveis de articulação do PML [Fonte: AMN, 2017]

Grau de Prontidão	Nível e Autoridade	Conceito
1º Grau	Nacional Diretor-Geral da Autoridade Marítima	Integração de meios nacionais e eventualmente internacionais
2º Grau	Regional Chefe do Departamento Marítimo respetivo	Atuação integrada dos meios existentes na região
3º Grau	Local Capitão do Porto ou Administração Portuária	Atuação local com recursos a meios existentes no porto
4º Grau	Local Capitão do Porto ou Administração Portuária	Atuação local com recursos a meios existentes no porto



O PML estabelece, ainda, um protocolo de resposta a incidente, definindo as etapas a percorrer no decorrer de uma ação de resposta a incidente (Ilustração 6) (AMN, 2017). Sendo de salientar a contemplação, no protocolo de resposta do PML, do pedido de previsão de deriva ao IH. Reforçando a pertinência e importância do estudo e análise desenvolvida na presente dissertação.

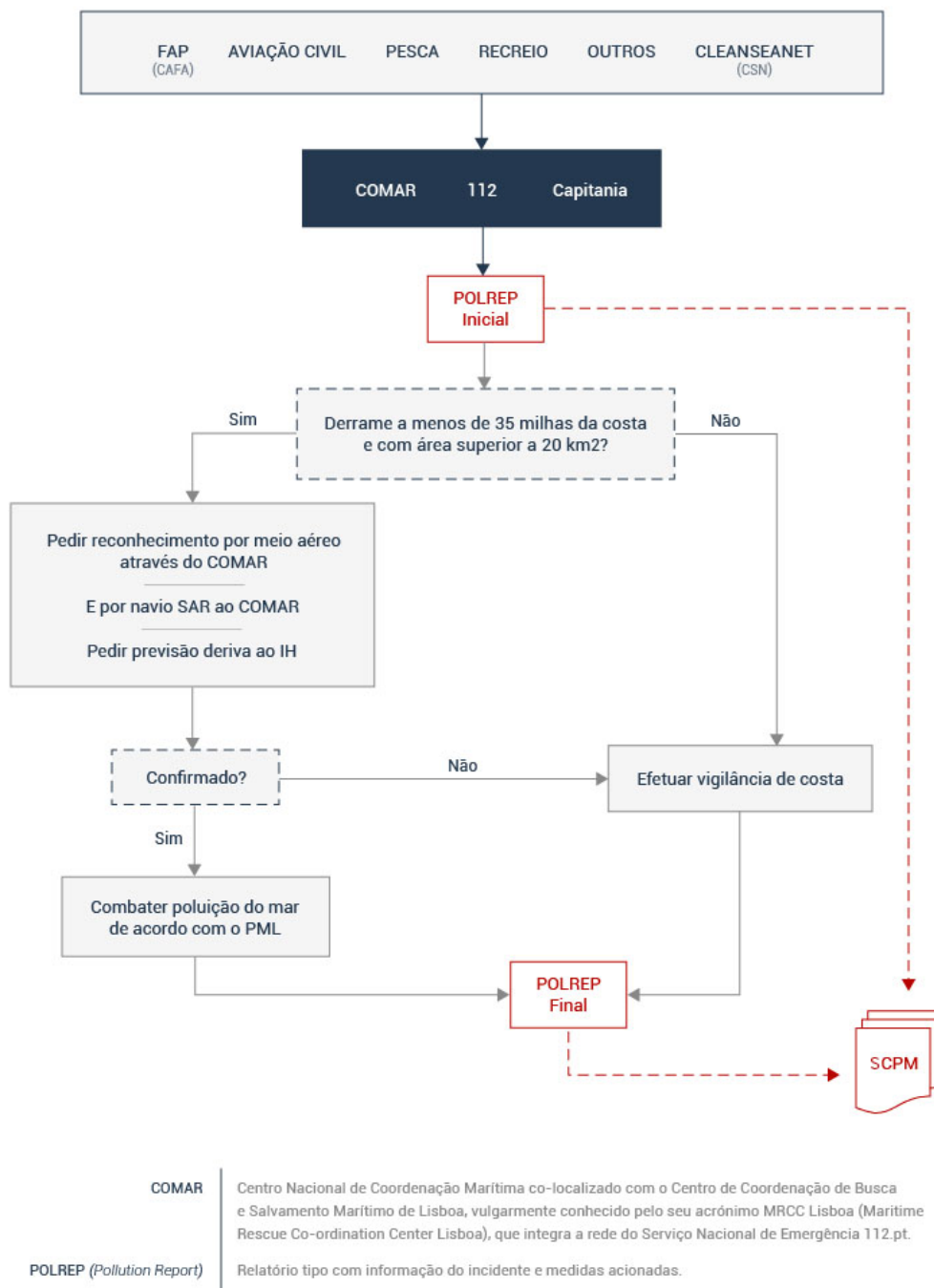


Ilustração 6 - Organograma do procedimento de resposta a incidente do PML

1.2 Justificação do Tema

A preocupação mundial com a poluição do meio marinho, a constatação das suas consequências ambientais, económicas e sociais, aliadas a um crescente volume de tráfego marítimo a circular nas nossas águas traduzem uma preocupação nacional no que respeita ao risco de ocorrência de episódios de poluição do mar por hidrocarbonetos e ao modo como o país se encontra pronto e preparado a responder numa “situação de crise”.

Os resultados do modelo de deriva superficial do IH prestam um apoio fundamental na condução das operações de combate à poluição do mar, em todos os graus de prontidão do PLM, com principal destaque na distribuição e movimentação dos meios de combate e proteção ao longo da costa. Como tal, é importante que esta ferramenta se mantenha atualizada e capaz de fornecer informação correta e completa para apoio à decisão dos coordenadores nacionais nas ações de combate.

A presente dissertação pretende prestar contributos no sentido de, atendendo aos desenvolvimentos tecnológicos e científicos atuais e às necessidades nacionais, auxiliar no melhoramento e desenvolvimento do modelo do IH por forma a beneficiar as ferramentas de trabalho dos coordenadores nas operações de combate.

Esta investigação surge, também, no seguimento da integração do modelo de deriva no Centro Meteorológico do IH, processo do qual brotarão diversas alterações e melhoramentos relativamente à versão atual. Esta integração conta facilitar o acesso ao modelo bem como melhorar os seus resultados.

1.3 Objetivos

O principal objetivo da dissertação é analisar o modelo de previsão de deriva superficial do IH, no âmbito da temática da modelação de derrames de HC no mar. Neste contexto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Aprofundar os conhecimentos sobre os HC, as suas propriedades e características;
2. Identificar e descrever os processos de transformação dos HC que sucedem um derrame;

3. Investigar modelos e formulações para integração de processos de transformação do óleo na modelação de derrames de HC;
4. Estudar e descrever ferramentas de modelação de derrames de HC e as suas características;
5. Analisar e apresentar o modelo de previsão de deriva superficial do IH nas suas diversas vertentes;
6. Comparar e analisar o modelo de previsão de deriva superficial do IH com ferramentas de modelação de derrames de HC existentes;
7. Averiguar se o modelo de previsão de deriva superficial do IH preenche as necessidades nacionais, no âmbito do combate à poluição do mar por HC;
8. Identificar oportunidades de melhoria do modelo de previsão de deriva superficial do IH;

1.4 Questões de investigação

Ao longo da presente dissertação pretende-se dar resposta à seguinte questão:

- De que forma se enquadra o modelo de previsão de deriva superficial do IH no âmbito da modelação de derrames de HC no mar?

Contudo, de modo a sustentar a investigação e os seus resultados foram formuladas várias questões derivadas:

1. Quais as problemáticas envolvidas na modelação de derrames de HC?
2. Quais as particularidades da modelação de derrames de HC?
3. Qual a habilitação do modelo de previsão de deriva superficial do IH no contexto da modelação de derrames de HC?
4. De que forma a apresentação resultados do modelo de deriva superficial do IH satisfazem as necessidades nacionais, no âmbito do combate à poluição do mar por HC?
5. Como colmatar as suas vulnerabilidade e quais as oportunidades de melhoria do modelo para adaptação ao contexto da modelação de derrames de HC?

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo pertence-se fazer um enquadramento geral do tema em estudo, abordando a temática da poluição do mar, as causas de poluição do mar, o SCPM, o PML e o papel do cálculo da deriva do IH. Pretende-se, ainda, apresentar os objetivos a atingir e apresentadas as questões de investigação, a justificação do tema e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, são descritas as suas principais características, identificados os tipos de categorização de HC existentes. São também explicados os processos de transformação químicos e físicos que os HC sofrem após um derrame.

O terceiro capítulo, é dedicado à modelação de derrames de HC. Destina-se a introduzir o conceito de modelação operacional, a apresentar métodos e formulações para a integração dos processos de transformação do óleo nos modelos, por fim, e a apresentar três exemplos de ferramentas de modelação de derrames de HC.

No quarto capítulo, é apresentado e analisado o modelo de previsão de deriva superficial do IH. Num âmbito específico, é esclarecida a origem, o âmbito, a apresentação dos resultados e a sua metodologia de formulação do modelo. São também apresentados os resultados da comparação com outros modelos de previsão operacional, no âmbito dos derrames de HC.

No quinto capítulo, é apresentada a discussão de resultados, começando pela descrição dos resultados da análise do modelo do IH e da apresentação das sugestões de melhoria do modelo de deriva do IH.

No sexto e último capítulo, são retiradas algumas ilações sobre o trabalho realizado e são feitas recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Os hidrocarbonetos e as suas problemáticas

2.1 Propriedades dos hidrocarbonetos

Conhecer as características e o tipo de óleo derramado, inclusivamente compreender as alterações físicas que as massas derramadas sofrem, é indispensável em todas as etapas inerentes ao combate da poluição do mar (Hollebone, 2015, p. 39). Por exemplo, na fase de detecção, apesar de atualmente existirem modernos métodos com recurso a sistemas de detecção remota, são ainda muitos dos sistemas de detecção que sofrem limitações quando sujeitados a certos tipos de substância derramada ou na presença de certos tipos de manchas⁴. Na escolha dos métodos de contenção, de recolha e de transporte do produto derramado, é igualmente importante este conhecimento, principalmente na altura de tomada de decisão sobre quais os métodos recomendados e capazes de serem empregues para cada situação. É indispensável, para a modelação de derrames uma adequada identificação e caracterização da substância derramada.

Um obstáculo detetado na padronização da caracterização dos HC prende-se com o facto de esta ser feita com objectivo de servir diferentes propósitos, como servir a vertente industrial ou operacional. Infelizmente, as propriedades geralmente medidas e controladas pelos produtores e refinadores de HC não são as ideais, quando comparadas com as necessidades de informação para uma situação de combate à poluição do mar. De modo a efetivar e acelerar os processos de tomada de decisão em situações de poluição marítima por HC, o ideal seria que os controlos efetuados pelas entidades responsáveis contemplassem os parâmetros e dados essenciais para responder a necessidades como (Hollebone, 2015):

- Quais as propriedades físicas do óleo e como é que estas se alteram e decompõem com o tempo;
- Como é que a variação das características e da composição dos HC derramados afectam o comportamento e deriva da mancha originada;
- Se existirá a criação de emulsões ou de que forma os óleos irão absorver a água;

⁴ Na detecção por captura de imagens por sensor infravermelho (IV), a espessura das manchas afeta a detecção, manchas pouco espessas e emulsões não são detetadas (Moreira, 2016).

- Se o óleo tem tendência a afundar;
- Qual o perigo para o pessoal no local, no processo de limpeza; e
- Qual a toxicidade do óleo para os organismos marinhos.

No entanto, e não sendo ainda possível aceder à informação anterior nos padrões ideais, os HC são caracterizados e organizados pelas suas propriedades físicas e químicas e é a partir das mesmas que posteriormente são estabelecidos e calculados os parâmetros necessários, tanto para a modelação do comportamento da mancha como para os restantes processos, como a recolha e limpeza do óleo derramado.

2.1.1 Características dos Hidrocarbonetos

À semelhança de qualquer outra substância, os HC, apresentam inúmeras características: diferentes cores, cheiros, texturas, etc. Contudo, no âmbito da modelação de derrames e do combate à poluição no mar importa focar algumas características em particular, nomeadamente as necessárias para determinar o movimento e comportamento de HC derramados e para apoiar ações de combate à poluição do mar são a (1) viscosidade, a (2) densidade, a (3) “densidade AIP”, o (4) ponto de inflamação, o (5) ponto de fluidez, o (6) ponto de ebulição e a (7) solubilidade, que passo a descrever:

(1)Viscosidade

A viscosidade traduz a resistência de um fluido ao movimento. Quanto menor a viscosidade maior a fluidez. (Fingas, 2016). A viscosidade de um óleo está relacionada com a sua composição química. Por esse motivo num derrame de HC podem estar presentes uma grande variedade de viscosidades em função do óleo derramado (Hollebone, 2015).

Logo após uma situação de derrame, a viscosidade sofre alterações dada a interação com o meio. Tanto pela evaporação dos componentes mais leves, o que resulta num aumento de viscosidade (Hollebone, 2015), como pela variação de temperatura, em que temperaturas mais baixas provocam um aumento da sua densidade o que induz um aumento de viscosidade (Fingas, 2015).

No contexto operacional, no decorrer de uma operação de combate à poluição no mar, a viscosidade é a principal propriedade a considerar na escolha e na eficácia dos meios de combate, sendo, a decisão de qual o tipo de recuperadores⁵ a utilizar um perfeito exemplo disso (DGAM, 2011).

(2) Densidade

De uma forma geral, a densidade de um fluido traduz-se pela quantidade de massa presente por unidade de volume, geralmente expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

$$Densidade = \frac{Massa}{Volume}$$

A densidade da maioria dos óleos varia entre 0.7 a 0.99 g/cm³ e a densidade da água do mar é geralmente 1.027 g/cm³, o que resulta que na sua maioria os óleos flutuem quando derramados no mar. Contudo, à medida que atuam sobre a mancha os processos de transformação após o derrame, a densidade de um óleo derramado aumenta. Em situações nas quais a densidade do óleo se torna superior à da água, este afunda (Fingas, 2015). Do ponto de vista operacional, esta é uma situação a evitar, pois uma vez afundado dificilmente pode ser extraído.

(3) Densidade API

A “densidade AIP” é outra medida de densidade, esta é inversamente proporcional à densidade do óleo aos 15.6°C, e é calculada em relação à densidade da água. Foi desenvolvida pelo *American Petroleum Intitute* (API) para definir a densidade na indústria petrolífera de modo a verificar o quão pesado ou leve é um óleo comparativamente à água. (Fingas, 2015). A “densidade API” é dada pela seguinte fórmula (Azevedo, 2010):

$$Densidade\ API = \frac{141.5}{\Delta} + 131.5$$

⁵ Recuperadores (Skimmers) são os equipamentos utilizados para recolha de substâncias derramadas no mar (DGAM, 2011).

Onde a “Densidade API” é dada em função de Δ , sendo $\Delta = \text{Densidade do óleo} / \text{Densidade da água}$. Esta unidade de medida refere-se apenas produtos frescos, uma vez que, tal como acontece com a densidade, após derramados as propriedades dos óleos alteram-se (Azevedo, 2010).

(4) Ponto de inflamação – “flash point”

O ponto de inflamação de um óleo é a temperatura a que um composto tem de ser aquecido para que liberte vapores inflamáveis, quando exposto a uma fonte de ignição. Quanto mais baixo for o ponto de inflamação de um óleo, maior a sua taxa de evaporação à temperatura ambiente e maior o perigo que representam. Óleos com baixos pontos de inflamação podem entrar em combustão apenas na presença de uma fonte de calor como uma faísca ou um telemóvel em utilização (DGAM, 2011).

Esta característica permite ponderar a volatilidade e resistência de um óleo ao fogo (Azevedo, 2010). Numa componente operacional, esta é uma característica fulcral no que diz respeito à segurança nas operações de combate à poluição do mar por HC, uma vez que conhecendo o ponto de inflamação de um óleo pode-se estimar a quantidade de HC derramado e o seu estado de degradação (DGAM, 2011). O ponto de inflamação é também importante numa fase posterior à ação de combate, sendo também utilizado para calcular as temperaturas de segurança para o transporte e armazenamento dos diferentes óleos (Azevedo, 2010).

(5) Ponto de fluidez – “pour point”

O ponto de fluidez, também designado por ponto de corrimento, define a temperatura mínima a que um óleo flui. Importa notar que o ponto de fluidez não é o ponto de solidificação. Os HC são constituídos por centenas de compostos e nem todos se encontram no estado sólido aquando do ponto de fluidez (Fingas, 2015). O ponto de fluidez é extremamente difícil de quantificar e medir, contudo existem bases de dados com intervalos de valores para alguns produtos. Porém, o ponto de fluidez não deve ser utilizado como uma temperatura exata em que uma substância deixa de fluir, mas sim como uma indicação (Azevedo, 2010).

O ponto de fluidez influencia verdadeiramente as operações de recolha de óleos derramados, uma vez que se a temperatura do HC for superior ao seu ponto de fluidez não se podem utilizar recuperadores na recolha das substâncias derramadas (DGAM, 2011).

(6) Ponto de Ebulição – “boiling point”

O ponto de ebulição de um óleo é a temperatura em que um óleo passa do estado líquido para o estado gasoso, à pressão atmosférica. Esta é uma característica relevante para a determinação das taxas de evaporação de um óleo. É ainda um importante parâmetro de entrada na previsão do envelhecimento dos óleos após um derrame, fator de apoio à decisão nas ações de combate à poluição no mar por HC (Azevedo, 2010).

(7) Solubilidade

A solubilidade de um óleo na água traduz a quantidade de óleo que se dissolve na água. Conhecer a solubilidade do óleo derramado não é imperativo para cálculos e modelação de derrames de H, uma vez que a quantidade de óleo perdido pela sua dissolução na água do mar é muito baixa. A preocupação associada à solubilidade de um óleo é o facto que nos HC os principais componentes solúveis são também os mais tóxicos. O que resulta que uma pequena quantidade de substância dissolvida possa ter um grande impacto nos ecossistemas (Fingas, 2015). Normalmente, quanto maior a quantidade de componentes voláteis na composição do HC, mais solúvel na água é o óleo (DGAM, 2011).

2.1.2 Categorização de Hidrocarbonetos

Existem variadas formas de classificar os HC em categorias. Estas variam consoante os autores, e apresentam diferentes parâmetros caracterizadores. Segundo M. Fingas e B. Hollebone (2015) os HC são distribuídos, com base na sua composição química, pelos quatro grupos seguintes: Saturados, Aromáticos,

Resinas e Asfaltenos. Já na *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*, conhecida como MARPOL 73/78⁶ distinguem-se os HC (incluindo todas as substâncias líquidas transportadas por navios) conforme a sua toxicidade para o meio marinho e para a vida humana, segundo as seguintes quatro categorias: Categoria A, Categoria B, Categoria C e Categoria D (decrecendo o nível de toxicidade entre cada categoria, sendo A a mais tóxica e D a menos tóxica)⁷.

Outra classificação existente, utilizada pela DGAM no seu manual “Guia de apoio ao combate à poluição do mar por hidrocarbonetos e outras substâncias perigosas”, divide os HC em cinco grupos, desta vez em função da sua densidade (DGAM, 2012):

- Tipo I – HC voláteis leves, como a gasolina, o querosene ou a parafina *diesel*. Têm baixa viscosidade, dissolvem-se facilmente na água, e evaporam-se e dispersam com facilidade. São tóxicos, mas como se evaporam depressa a toxicidade reduz-se rapidamente.
- Tipo II – HC moderados e pesados, como a maioria dos crudes, o gasóleo, o *fuel-oil* e o óleo de lubrificação leve. Têm baixa a moderada viscosidade, moderada solubilidade na água, e tendem a formar emulsões estáveis.
- Tipo III – HC pesados, como os crudes muito parafínicos, as emulsões de HC na água e o óleo de lubrificação pesado. Com tempo quente tendem a libertar os componentes voláteis e podem tornar-se tão densos que se afundam.
- Tipo IV – HC residuais, como os *bunkers*, os *heavy fuel-oil* e o asfalto. Têm alta viscosidade, baixa solubilidade na água, não se dispersam muito na água e podem formar massas de alcatrão (*tar balls*)
- Tipo V – HC de densidade superior à da água que se afundam nela. São semissólidos, não-voláteis, não se dissolvem na água e formam *tar balls*. Pouco tóxicos.

⁶ Protocolo resultante da Convenção internacional para a Prevenção da Poluição por Navios, feito a 17 de fevereiro de 1987 em Londres. Aprovado para adesão pelo Decreto do Governo 25/87, de 10 de Julho.

⁷ Lista de óleos, Apêndice 1 do Anexo 1 da MARPOL 74/78

Importa salientar que, esta última caracterização, é apropriada e direcionada para o âmbito operacional, uma vez que divide os HC de forma a, rapidamente, se poder tomar decisão relativamente aos meios de combate a empregar, por exemplo os métodos de recolha ou a utilização de dispersantes⁸.

Conhecer o tipo de HC permite conhecer as propriedades do óleo e ajuda prever o modo como o este irá reagir uma vez derramado no meio ambiente. É também um fator igualmente importante, na determinação do impacto e custos do derrame (Etkin, 2015).

2.2 Processos de transformação dos hidrocarbonetos após derrames

Numa fase posterior a um derrame, o cenário altera-se. As características e dados relativos ao óleo passam a ser inúteis caso não sejam considerados os processos de envelhecimento e os efeitos meteo-oceanográficos sofridos pela mancha de óleo derramado ao longo do tempo. A experiência acumulada demonstrou que as características físicas e químicas de um HC podem mudar bastante durante o decorrer de um derrame. Estas mudanças têm efeitos decisivos no destino, comportamento e nas consequências do óleo no meio ambiente (Fingas, 2015).

São os processos de transformação dos óleos os principais regentes do movimento e evolução das manchas de HC. Genericamente, estes processos podem ser de dois tipos. O primeiro é de “*weathering*”, e o segundo envolve um grupo de processos relacionados com o movimento do óleo no meio ambiente. Os dois tipos influenciam-se mutuamente. Estes processos dependem fortemente do tipo de óleo derramado e das condições meteo-oceanográficas no momento inicial e posterior ao derrame. (Fingas, 2015).

O termo “*weathering*” é utilizado para designar a grande variedade de processos físicos, químicos e biológicos causados pelo ambiente no óleo derramado. Estes processos, que podem também ser mencionados como processos

⁸ Dispersantes são um agente de tratamento de HC derramados. A aplicação de dispersantes provoca a dispersão em pequenas gotículas dos HC pelas camadas superiores da coluna de água (Fingas, 2001).

reológicos⁹ ou de envelhecimento, englobam processos como a evaporação, espalhamento, emulsificação, entre outros processos como a dissolução, a dispersão, a sedimentação, a foto-oxidação e a biodegradação (Ilustração 7).

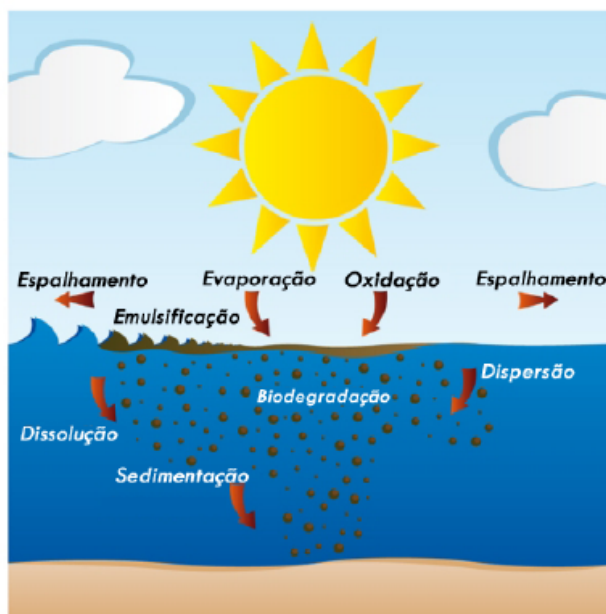


Ilustração 7 - Esquema dos processos reológicos que ocorrem durante um derrame de hidrocarbonetos [Fonte: Azevedo, 2010].

Os diferentes processos reológicos iniciam-se assim que o óleo é derramado. Contudo, como é possível observar no esquema da Ilustração 8, os processos têm períodos de atuação e graus de relevância diferentes. Estes não são consistentes ao longo da duração do derrame, sendo mais intensos numa fase inicial (Fingas, 2015).

Compreender o comportamento dos óleos após o derrame é extremamente importante no desenvolvimento de modelos de previsão de estado e deriva dos derrames. As diferenças de interação entre os diferentes processos podem originar diferenças significativas nos resultados da modelação de HC (Azevedo, 2010). Os períodos de atuação e graus de relevância dos processos de transformação dependem mais do tipo de óleo do que das condições ambientais. Ainda assim, a maioria dos processos são bastante afetados pela temperatura, decrescendo a sua

⁹ Processos reológicos são relativos ao escoamento e deformação dos materiais.

influência à medida que as temperaturas se aproximam dos 0 graus Celsius (Fingas,2015).

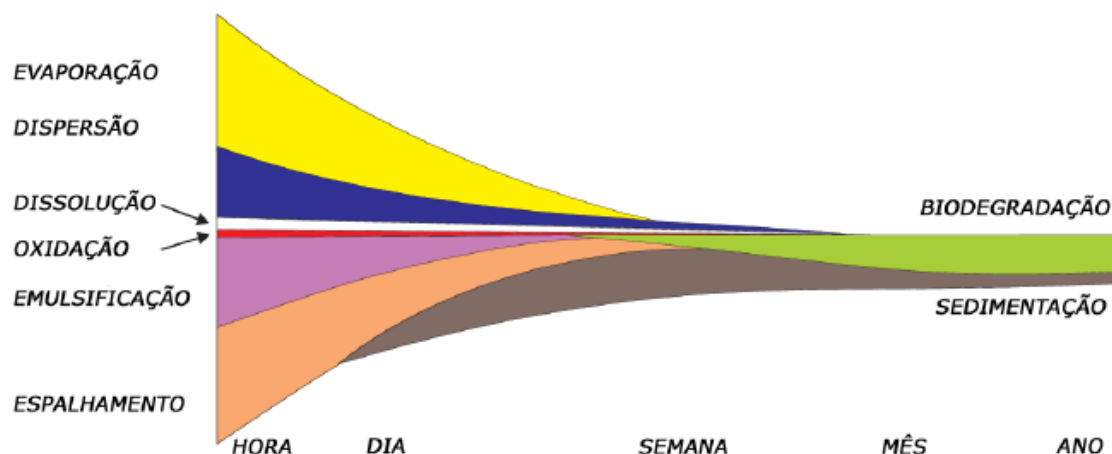


Ilustração 8 - Esquema dos períodos de atuação e grau de relevância dos processos reológicos que ocorrem durante um derrame de hidrocarbonetos [Fonte: Azevedo, 2010].

2.2.1 Deriva (*drifting*)

Os derrames de HC no mar provocam a formação de uma ou mais manchas¹⁰ de óleo na superfície do oceano, conforme a densidade do óleo e a agitação marítima (DGAM, 2011). Depois de formadas, as manchas derivam em concordância com o vento e com as correntes de superfície, como consequência da advecção e da dispersão turbulenta da mancha (Azevedo, 2010). Apesar de ser influenciada pelas características do óleo, a deriva tem como principal factor impulsionador de movimento a força do vento sobre a superfície do mar. A força do vento sobrepõe-se, ainda, à influência das correntes marítimas (geralmente mais lentas que o vento) e à agitação marítima (maior ação no espalhamento que na deriva) (DGAM, 2011).

No âmbito operacional, a previsão da deriva da mancha é dos principais requisitos para a tomada de decisão. A previsão de deriva da mancha, acompanhada de uma posição e de um intervalo de tempo estimados para chegada da mancha a terra, são fatores decisivos na definição de prioridades e posicionamento de meios para o combate.

¹⁰Uma mancha de óleo derramado pode também ser denominada de *slick*.

2.2.2 Espalhamento (*spreading*)

Assim que derramado na água, o óleo inicia o processo de espalhamento até formar um *slick* à superfície do mar (DGAM, 2011). O espalhamento resulta da interação entre forças, dependendo “do balanço entre as forças gravíticas, inerciais, viscosas e tensões nas interfaces” (Azevedo, 2010). O processo de espalhamento origina o alastramento da área ocupada pela mancha e, conseqüentemente, a redução da sua espessura. Estas são variáveis fundamentais para os modelos de previsão de estado e derivada de HC (Azevedo, 2010).

Como o início do processo de espalhamento surgem as primeiras alterações químicas do óleo como o aumento de densidade e viscosidade, que pode afetar outros processos de transformação com a dispersão, evaporação e emulsificação (Azevedo, 2010).

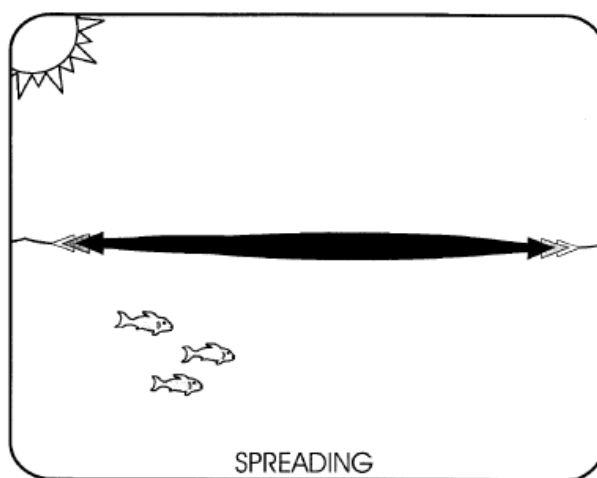


Ilustração 9 - Representação esquemática do processo de espalhamento [Fonte: Azevedo, 2010]

Operacionalmente, o impacto do espalhamento numa ação de combate pode manifestar-se na influência que tem sobre outros processos e na extensão do derrame. A dimensão da mancha, condiciona a mobilização dos meios e, na presença de um derrame de grandes dimensões, força a criação de prioridades identificando zonas sensíveis na costa para primeira intervenção.

2.2.3 Evaporação (evaporation)

A evaporação é um processo de “weathering” muito importante, uma vez que é um processo natural para a remoção de HC da água (DGAM, 2011). Este processo tem um grande impacto na quantidade de óleo remanescente na água após um derrame, especialmente se se tratar de um óleo leve. Uma mancha de um óleo leve, como a gasolina, pode evaporar por completo a temperaturas ambientes normais em apenas alguns dias, o mesmo não acontecendo com um óleo mais pesado, como o *Bunker C*¹¹, em que apenas uma pequena percentagem de óleo evapora.

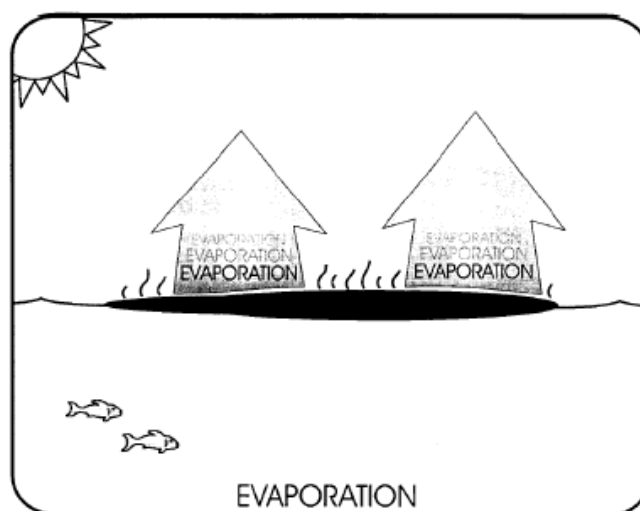


Ilustração 10 – Representação esquemática do processo de evaporação [Fonte: Azevedo, 2010]

As taxas de evaporação dependem de diversos fatores: o baixo ponto de ebulição dos componentes leves, a área superficial e espessura da mancha, as pressões de vapor de óleo e o coeficiente de transferência de massa, que, por sua vez, dependem da composição do óleo (Azevedo, 2010). As taxas são elevadas imediatamente após o derrame e, em seguida, diminuem consideravelmente. Cerca de 80% da evaporação ocorre durante os primeiros dois dias após o derrame (Ilustração 11) (Fingas, 2015).

¹¹ O Bunker C é um óleo combustível pesado de alta viscosidade.

A densidade e a quantidade de componentes voláteis do HC são os principais influenciadores da velocidade de evaporação: óleos mais densos evaporam menos e mais lentamente. Uma particularidade na evaporação dos óleos, comparativamente à da água, é que é bastante menos dependente da velocidade do vento e da extensão do derrame. A evaporação dos óleos pode ser consideravelmente retardada devido à formação de uma “crosta” ou “pele” por cima do óleo. Este fenómeno, no entanto, é mais comum em derrames em terra ou, quando no mar, em zonas calmas em que a agitação marítima não misture as camadas de óleo (Fingas, 2015). A evaporação provoca o aumento de densidade e viscosidade da mancha de óleo derramado (Azevedo, 2010).

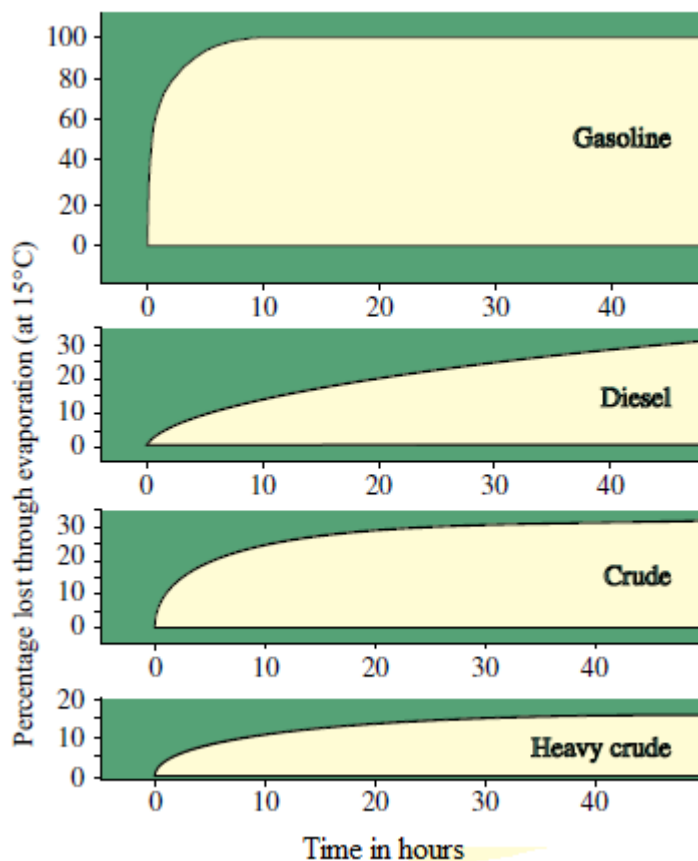


Ilustração 11 - Curvas representativas das taxas de evaporação de alguns óleos [Fonte: Fingas, 2015]

Do ponto de vista operacional, o impacto da evaporação irá depender do tipo de óleo. Um derrame de um óleo leve, que evapore rapidamente, faz com que o processo de recolha fique facilitado sendo necessário proceder à recolha de uma menor quantidade de óleo do que a inicialmente derramada, ou até mesmo nenhuma. Contudo, num derrame de um óleo mais pesado a evaporação pode levar ao desenvolvimento da mancha para uma mancha de alta viscosidade dificultando assim os processos de recolha dos resíduos (Fingas, 2015).

2.2.4 Emulsificação (*water-in-oil emulsion*)

As alterações físicas e químicas despontam assim que o óleo é derramado. Os componentes mais leves evaporam, os componentes solúveis dissolvem-se na água e os restantes, os componentes insolúveis, emulsificam ou dispersam-se na coluna de água sob a forma de pequenas gotas (Azevedo, 2010). A emulsificação é um processo que pode ocorrer após um derrame e resulta na criação de emulsões denominadas por “mousse”, devido à sua cor castanha ou alaranjada (Fingas, 2015). Este fenómeno resulta da interação do óleo com a água do mar e depende da composição do óleo e da agitação marítima (DGAM, 2011). O processo consiste na agregação de pequenas gotículas de água no interior do óleo, transformando o óleo numa emulsão (Azevedo, 2010).



Ilustração 12 - Aspeto de uma emulsão de um HC em água [Fonte: DGAM, 2011]

A formação de emulsões altera drasticamente as propriedades físicas do óleo. Emulsões estáveis¹² podem conter 60 a 80% de água, o que se traduz num aumento de volume do produto derramado (2 a 5 vezes mais do volume original), num aumento de viscosidade e de densidade relativamente à substância derramada (Fingas, 2015). Estas alterações resultantes da formação de emulsões têm impacto noutros processos de envelhecimento nomeadamente na redução do espalhamento e da evaporação, consequência do aumento de viscosidade e densidade (Azevedo, 2010).

O impacto do processo de emulsificação na condução das operações de combate assenta na dificuldade de recolha das emulsões com os recuperadores (o aumento de viscosidade pode requerer troca do recuperador inicial) e na significativa redução da eficiência dos dispersantes.

2.2.5 Outros processos

Além dos processos supramencionados advêm também de um derrame de HC processos de dispersão, dissolução, sedimentação, foto-oxidação e biodegradação. São, igualmente, processos de envelhecimento que conduzem a alterações no estado e no movimento da mancha derramada. Porém, como exposto anteriormente na Ilustração 8 são processos que, pelos seus períodos de atuação e graus de relevância, apresentam menos relevância nas alterações de estado e movimentação da mancha derramada comparativamente com os processos acima desenvolvidos.

- **Dispersão**

Este processo traduz a disseminação do óleo pela coluna de água, sob a forma de pequenas gotas. A dispersão é originada pelos movimentos turbulentos do vento e das ondas à superfície da água (Azevedo, 2010).

- **Dissolução**

¹² Segundo Azevedo (2010) “A tendência de formação e estabilidade das emulsões parecem ser função do conteúdo em asfaltenos e parafinas do petróleo. Daí que a maior parte dos produtos refinados não formem emulsões água-no-óleo estáveis devido à ausência de parafinas e asfaltenos”.

Através do processo de dissolução, alguns dos componentes solúveis do óleo são dissipados para a superfície de água imediatamente abaixo da mancha derramada. Este processo afeta apenas uma pequena porção de óleo, normalmente, menos de 1% da massa inicial de óleo derramado. O principal impacto da dissolução é o facto dos componentes solúveis dos óleos serem também os mais tóxicos para a vida marinha. Se ocorrer um derrame em águas pouco profundas e com o óleo com uma quantidade de componentes solúveis elevados pode resultar na morte de um elevado número organismos marinhos (Fingas, 2015).

- **Sedimentação**

O processo de sedimentação decorre do aumento de densidade das gotas das substâncias resultantes do derrame (óleo, emulsões ou mistura de óleo com dispersante). Estas, logo que atinjam uma densidade superior à da água do mar, depositam-se no fundo do meio marinho (DGAM, 2011).

- **Foto-oxidação**

Este processo depende bastante do tipo de óleo e das condições ambientais, e ocorre devido à exposição da mancha às radiações solares. A foto-oxidação provoca a transformação da substância derramada por processos fotoquímicos (foto-oxigenação) que podem resultar na alteração a composição do óleo (DGAM, 2011). Este processo potencia a dissolução, a dispersão e a emulsificação dos óleos derramados (Azevedo, 2010).

- **Biodegradação**

O processo de biodegradação consiste no consumo por degradação dos hidrocarbonetos derramados por diversos micro-organismos (como bactérias e fungos) presentes na água. A biodegradação depende da presença destes organismos na água, a sua atuação será mais significativa em função da extensão do derrame e do contacto com os micro-organismos, da temperatura (quanto maior a temperatura maior a degradação) e da disponibilidade de nutrientes e

oxigénio. Os processos de espalhamento, dispersão e dissolução apoiam a ocorrência de biodegradação (Azevedo, 2010).

Capítulo 3 – Modelação de derrames de hidrocarbonetos

3.1 Modelação Operacional

A modelação da previsão de movimento, da deriva, de HC derramados é um processo bastante complexo. A quantidade de variáveis envolvida é elevada bem como o número de variáveis, internas e externas, envolvidas. Devido, basicamente, ao estado da substância em discussão, é uma modelação bastante mais trabalhosa quando comparada com modelações como as desenvolvidas no âmbito de SAR, em que os objetos não sofrem alterações de forma ou estado significativas (Hackett *et al.*, 2006).

Azevedo (2010) citou Reed et al. (1999) que refere o seguinte: “*A capacidade de representar numericamente os processos de evolução dos hidrocarbonetos no meio aquático é limitada, havendo várias abordagens possíveis, desde os modelos de partículas até aos modelos tridimensionais de evolução dos processos físico-químicos*”. Neste contexto, existem inúmeras variantes na resolução do problema da “modelação de HC”.

Segundo Fingas (2015), dentro do propósito de modelar derrames de HC presenciam-se duas situações: “*Operational modeling is different than academic research. Publishing a paper is much easier than providing an accurate and useful trajectory in a real event*” (Fingas, 2015). Neste contexto existem: os modelos académicos, resultantes de estudos científicos que apesar de rigorosos são complexos e exigem elevada capacidade de computação, utilizadores altamente qualificados e tempo para aplicar os sistemas; e os modelos operacionais, que apesar de assentarem numa científica, são mais simples, expeditos e adaptados às necessidades e contextos de uma instituição ou organismo próprios, como por exemplo a necessidade de uma resposta rápida e segura, ao alcance de um utilizador comum não especializado a um evento potencialmente de risco. Evidentemente a realidade do modelo analisado na presente dissertação insere-se nos modelos do segundo contexto.

3.2 Integração dos processos de transformação do óleo

No capítulo 2 foram apresentados os vários processos de transformação sofridos por uma mancha de óleo após um derrame. Na modelação de derrames de HC é fundamental considerá-los no cálculo do destino e movimento da mancha. Todos os processos de transformação estão interligados. Atualmente, existem modelos e formulações para todos os processos. No presente subcapítulo, serão apresentadas, para os processos de deriva, evaporação e espalhamento, algumas das teorias e formulações estabelecidas para integração em modelos numéricos.

3.2.1 Deriva

A integração numérica da deriva num modelo de derrames de HC é fundamental. De toda a informação passível de ser disponibilizada pelos modelos de previsão nenhuma, no contexto operacional, supera a importância da previsão de movimento e, se for o caso, do ponto de primeiro contacto da mancha com costa.

Os primeiros estudos desenvolvidos para definição da deriva das manchas derramadas assentavam em modelos bidimensionais e de superfície, calculando a deriva através da parametrização do vento e da corrente (Azevedo, 2010). Como referido no capítulo 2 a deriva depende, essencialmente, do vento à superfície. Contudo, em situações perto de terra, Fingas (2015) estabeleceu que uma mancha de óleo à superfície sujeita a uma velocidade de vento for inferior a 10 km/h¹³, a deriva da mancha movimentar-se-á a uma taxa de 100% da corrente de superfície e apenas 3% da velocidade do vento. Estas são algumas situações em que o vento não desempenha um papel predominante na movimentação da mancha. Contudo, uma mancha em mar aberto sujeita a vento com velocidade superior a 20 km/h, já é o vento o fator principal na determinação da deriva da mancha. Sendo que em qualquer situação deve sempre considerar-se ambos os fatores no cálculo da deriva.

Porém, os estudos evoluíram no sentido de integrar, no movimento da mancha, os processos de transformação dos HC após derramados e os movimentos ao longo da coluna de água, tornando os modelos cada vez mais próximos da

¹³ A velocidade de 10 km/h equivale, aproximadamente, a 5 nós.

realidade. Azevedo (2010) alertou para a importância do efeito da dispersão vertical, tanto na movimentação como na alteração de massa da mancha, e para os derrames ocorridos em profundidade¹⁴, modificando-se por completo os parâmetros de forçamento a que a mancha fica sujeita invalidando o uso de modelos superficiais 2D, uma vez que produzem resultados dissemelhantes e irrealistas.

Para proveito operacional, os modelos de deriva são, cada vez mais, interligados, direta ou indiretamente, a modelos hidrodinâmicos. Esta integração é frequente em modelos operacionais de sistemas de resposta a acidentes (Azevedo, 2010).

Modelos mais avançados contemplam a possibilidade de aquisição, em tempo real, de dados meteorológicos como campos de vento e correntes para integração no modelo de deriva. Os campos de correntes para forçamento das manchas podem ser obtidos através de radar ou de bóias derivantes. Em contrapartida, o tempo de processamento destes sistemas torna-os pouco eficientes, limitando a sua utilidade (Azevedo, 2010).

Graças aos avanços tecnológicos na área da computação, para completar os tradicionais modelos de partículas começam a surgir formulações alternativas baseadas em equações da dinâmica de fluídos, que permitem maior precisão. Segundo Azevedo (2010): “estes modelos simulam diretamente a dinâmica do fluído superficial da mancha de hidrocarbonetos”, não tendo sido implementados em sistemas reais dado o seu elevado custo computacional.

3.2.2 Espalhamento

Na formulação do processo de espalhamento, na grande maioria dos modelos de derrames, tem como base a teoria de Fay (1971) composta por três fases de espalhamento: (1) Gravítica-Inercial, (2) Gravítica-Viscosa e (3) Tenso-Viscosa (Azevedo, 2010):

¹⁴ Resultado de estudos acerca de um derrame ao largo das ilhas Shetland, na Escócia, em que o navio afundou e derramou aproximadamente 80 000 toneladas de crude. O crude derramado foi transportado em profundidade para Sul, contra a direção do vento (Azevedo, 2010). São exemplo de derrames em profundidade: acidentes com afundamento de navio, acidentes em plataformas *offshore* ou derrames de poços naturais.

- (1) Gravítica-Inercial – A principal força geradora de movimento é a força gravítica, equilibrada pela inércia do próprio óleo. Esta fase tem a duração de apenas algumas horas, exceto se se tratar de derrame contínuo.
- (2) Gravítica-Viscosa – O movimento da mancha continua a ser gerado pela força gravítica, contudo relaciona-se com a viscosidade entre o óleo e a água. Esta fase é implementada na maioria dos modelos desenvolvidos.
- (3) Tenso-Viscosa – Depois de espalhada, a mancha adquire a forma de uma camada fina à superfície, facilmente quebrável. Nesta fase, dado a fina espessura da mancha, a força gravítica assume um papel secundário sendo a tensão superficial a principal geradora de movimento.

A formulação de Fay, apresenta algumas limitações: não contempla a formação de *slick* alongados (rastos finos adjacentes à mancha principal), a taxa de espalhamento devido à viscosidade (óleos mais viscosos têm uma taxa de espalhamento inferior a óleos menos viscosos), separação dos *slicks* em manchas mais pequenas e a dependência entre a taxa de espalhamento e as condições de descarga (relações entre: libertação superficial/libertação em profundidade e descarga contínua/descarga instantânea) (Azevedo, 2010).

Dos estudos seguintes, surgiram outras teorias relativas ao espalhamento de manchas de HC, tais como (Azevedo 2010):

- Buist e Twardus (1984) propuseram uma alteração à taxa de espalhamento, incluindo um valor que dependia da razão entre a viscosidade do óleo e da água;
- Waldman *et al.* (1972) sugeriu que o espalhamento fosse considerado como uma descarga num canal, ou seja, numa só direção (ao longo do eixo da direção do vento e concentrações simétricas em volta do eixo).

São vários os modelos e formulações existentes. Atualmente, é possível prever, de acordo com as taxas de espalhamento e restantes condicionantes, informação como a extensão e espessura da mancha¹⁵.

¹⁵ Operacionalmente, informação relativa à extinção e espessura são dados importantes para as escolhas de meios e táticas para as operações de combate (por exemplo no posicionamento das barreiras de contenção).

3.2.3 Evaporação

No que concerne à formulação da taxa de evaporação existem várias teorias. Sendo que Azevedo (2010) destacou duas de entre as mais conhecidas: a de exposição evaporativa (Stiver e Mackay, 1984) e o modelo de pseudo-componentes (Payne *et al.*; Jones, 1997). O método da exposição evaporativa não necessita de informação relativa à composição do óleo o que, *a priori*, se apresenta como uma mais-valia. Baseando-se em simplificações, este método estabelece uma relação linear entre o ponto de ebulição da fase líquida e a fracção de matéria perdida por evaporação. Além de ser levantada a incerteza quanto à linearidade de tal relação, os resultados deste modelo podem apresentar-se bastante falíveis para óleos com curvas de destilação não-lineares, como os produtos refinados. (Azevedo, 2010). De acordo com Azevedo (2010) “esta metodologia não é a mais adequada para situações em que existem outros processos de perda de massa”, como a dispersão natural, retenção costeira, entre outros.

O método dos pseudo-componentes considera a substância derramada, os óleos-crude ou os produtos refinados, como sendo formados por uma série limitada de componentes discretos independentes, designados por pseudo-componentes, organizando-os consoante o seu peso molecular e ponto de ebulição. O cálculo do valor total de evaporação é dado pela soma das evaporações parciais de cada pseudo-componente, calculada através de uma expressão parametrizada pelos valores da pressão do óleo (Azevedo, 2010).

Tal como os outros processos, apresentam-se apenas algumas das diversas possibilidades de modelação da evaporação em derrames de HC.

3.3 Ferramentas de modelação de hidrocarbonetos

A modelação de derrames de hidrocarbonetos tem sido, ao longo dos anos, tema para inúmeras investigações, trabalhos e artigos científicos. Desses estudos e trabalhos, resultam muitas vezes empresas ou parcerias visando perpetuar os estudos e desenvolvimentos na área de modo a associá-los e utilizá-los em aplicações reais. Mundialmente existem duas grandes referências na área da modelação de derrames de HC: RPS *Applied Science Associates* (ASA) e o SINTEF.

A RPS ASA é uma empresa de consultoria norte-americana, e uma das mais preeminentes do mundo na criação de soluções na área da ciência e tecnologia. Realiza projetos de consultoria, modelação ambiental e aplicações para uma diversificada gama de clientes no governo norte-americano, na indústria e na comunidade académica. A RPS ASA desenvolveu diversos *softwares* na área da modelação de derrames de HC, nomeadamente modelos para derrames no mar, à superfície e em profundidade, e para derrames em terra. (RPS ASA, s. d.)

O SINTEF é um instituto de pesquisa multidisciplinar com peritos internacionais na área da tecnologia, medicina e ciências sociais, é considerado a maior organização independente de investigação da Escandinávia. Desde o início da exploração petrolífera na Noruega, o SINTEF tem sido uma das principais fontes de investigação, procurando aperfeiçoar o mapeamento e produção de recursos de petróleo e gás, noruegueses e globais, de forma lucrativa, segura e ambientalmente sustentável (SINTEF, s. d.).

Contudo, na ocorrência de uma situação real de derrame de hidrocarbonetos, a resposta nacional para a catástrofe é gerida, como referido anteriormente, por diferentes responsáveis de acordo com o PML. No entanto, no que concerne ao processamento e fornecimento de informação relativa à deriva do derrame, para apoio à tomada de decisão, é o IH que disponibiliza essa informação. Porém, o SCPM recorre, para efeitos de redundância e validação da informação, à plataforma MARPOCS (*Multinational Response and Preparedness to Oil and Chemical Spills*).

A plataforma MARPOCS é um projeto em desenvolvimento, e a sua criação decorreu da ratificação do Acordo de cooperação para a proteção das costas e águas do Atlântico Nordeste contra a poluição, conhecido como Acordo de Lisboa, estabelecido entre França, Espanha, Portugal e Marrocos. Este acordo ergueu-se da necessidade de cooperação regional no combater a poluição do mar por hidrocarbonetos e substâncias perigosas e nocivas (HNS) no Atlântico Nordeste, dado o historial de acidentes nas costas espanholas, marroquinas, francesas e portuguesas (DGAM, s.d.). A plataforma é suportada por fundos europeus e beneficia de colaboradores de todas as nacionalidades abrangidas pelo acordo. A nível nacional conta com a colaboração do Instituto Superior Técnico (IST), da

empresa *Action Modulers* e da Agência Regional para o Desenvolvimento da Investigação e Inovação. O conselho consultivo do projeto é igualmente composto por elementos de todas as nacionalidades, Portugal é representado pelo SCPM da DGAM, pela Administração de Portos da Região Autónoma da Madeira (APRAM) e pelo Serviço Regional da Proteção Civil da Madeira. (MARPOCS, s. d.).

Seguidamente, serão apresentados três exemplos de sistemas operacionais de modelação de HC. Dois modelos de referência internacional: o modelo OILMAP, desenvolvido pela RPS ASA; e o modelo OSCAR (*Oil Spill Contingency And Response*), desenvolvido pelo SINTEF; e o projeto da plataforma MARPOCS.

3.3.1 Modelo OILMAP

O OILMAP é utilizado mundialmente por várias companhias petrolíferas e governos internacionais. A abordagem do modelo torna-o acessível tanto para aplicação para a indústria, como para entidades governamentais, envolvidas no transporte e manejo de petróleo ou em equipas de treino e resposta a emergência.

O modelo OILMAP é uma ferramenta de modelação avançada, capaz de fornecer previsões rápidas de movimento e destino das manchas de óleo derramado, para derrames instantâneos ou em contínuo, em 2D e 3D. O modelo OILMAP padrão inclui, no cálculo da deriva e destino das manchas, contemplando algoritmos para os seguintes processos: espalhamento, evaporação, emulsificação e retenção costeira. Considera o tipo de óleo derramado, e o seu impacto no cálculo da distribuição da mancha em função do tempo. O OILMAP permite que a previsão fornecida possa ser atualizada pelo utilizador, de modo a fazê-la corresponder a áreas observadas, através de introdução de polígonos SIG (Sistemas de Informação Geográfica). O modelo disponibiliza uma base de dados de óleos (passível de ser alterada e atualizada pelo utilizador), ferramentas para dados meteo-oceanográficos e mecanismos de visualização. Além do modelo padrão, podem ser adicionados os seguintes módulos:

- OILMAPDEEP – Para simular libertações subaquáticas de óleo, capaz de prever as características do óleo derramado. Inclui ainda um módulo para

tratamento de dispersante subaquático para previsão dos efeitos do agente ao longo do tempo;

- AIRMAP – Para considerar a dispersão atmosférica, capaz de fornecer concentrações de hidrocarbonetos vaporizados para determinar zonas de exclusão devido à exposição atmosférica;
- OILMAPLAND – Para derrames provenientes de tubos ou instalações de armazenamento, aplicável em terra e à superfície da água. Principalmente, para apoio a derrames em terra que migram para valetas e lagos;
- SIMAP – Para integração dos processos de transformação mais complexos como: dissolução, sedimentação, interação com gelo e sedimentação costeira;
- *RunStoch* – Para análises de risco e planeamento de planos de contingência. Uma componente estocástica desenvolvida para calcular a probabilidade de impacto de derrames em áreas sensíveis, derivas de derrames mais prováveis, e os valores críticos como extensão máxima de costa afetada e tempo mínimo de deriva do óleo até terra (RPS, s. d.).

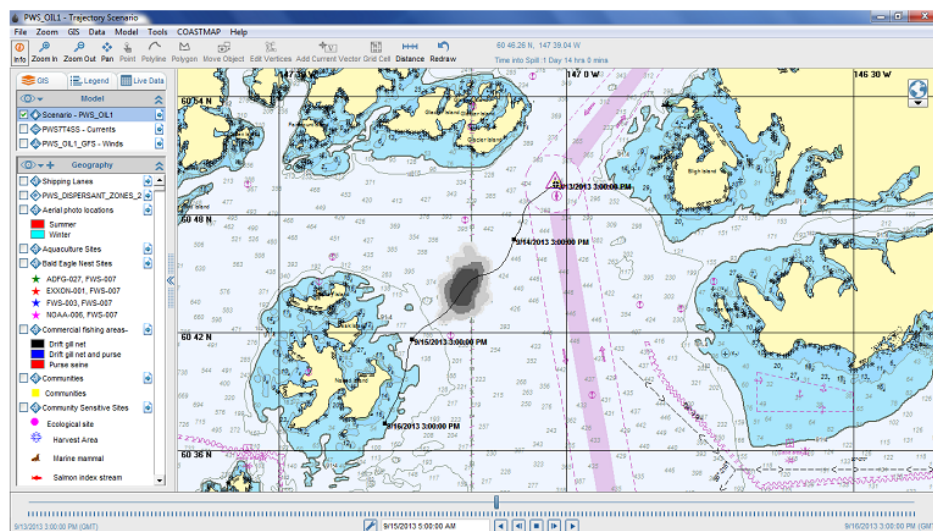


Ilustração 13 - Exemplo apresentação de resultados – Modelo OILMAP [Fonte: RPS ASA, s. d.]

O OILMAP apresenta-se como um modelo bastante completo, dos mais referenciados. Não sendo um modelo desenvolvido exclusivamente para a vertente

operacional, é de salientar a pertinência do módulo *RunStoch* no âmbito do apoio na coordenação de operações de combate à poluição.

3.3.2 Modelo OSCAR

O modelo OSCAR é direcionado para a análise de risco e planeamento de contingência e para a modelação de operações de combate de derrames de hidrocarbonetos, estando otimizado para utilização no Mar do Norte e Báltico, no Golfo do México e no Mar Mediterrâneo.

É uma ferramenta de simulação tridimensional (estuda os processos ao longo da coluna de água), considera o tipo de óleo (caracterização do óleo em 25 pseudo-componentes), integra os processos de *weathering* (inclui base de dados com resultados experimentais), calcula o impacto biológico em organismos marinhos, e, ainda, prevê a retenção costeira para vários tipos de costa. Este modelo é apto para derrames à superfície e em profundidade, com tempos de libertação de óleo imediatos, em contínuo, e, ainda, com interrupções.

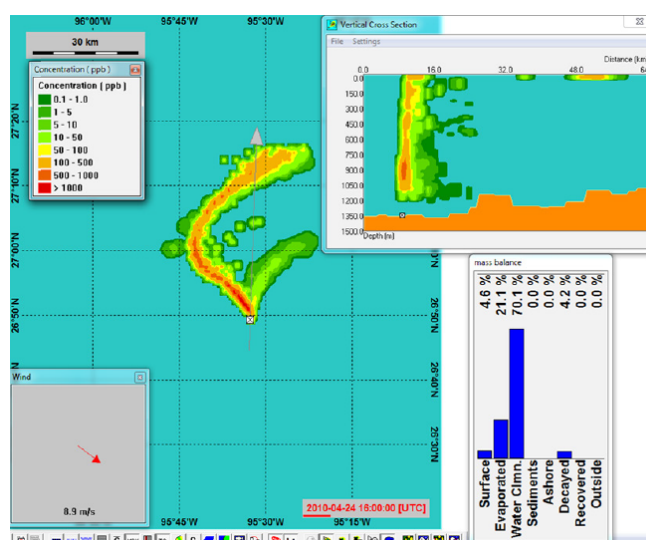


Ilustração 14 - Exemplo apresentação de resultados – Modelo OSCAR [Fonte: SINTEF, 2014]

O modelo calcula: a deriva e o destino da mancha, integrando os efeitos da corrente e vento na advecção do óleo; e o seu envelhecimento, considerando os processos de evaporação, espalhamento, emulsificação, dissolução e dispersão. O sistema disponibiliza ainda uma componente estocástica de simulação para as

ações de combate, apresentando os intervalos ideais para a recolha mecânica e para a aplicação de dispersantes na água e previsão de resultados das intervenções.

O modelo inclui dois módulos:

- *Oil Weathering Model* – Módulo para integração dos processos de weathering dos óleos derramados no mar, com base em formulação e resultados experimentais;
- *DeepBlow* – Para consideração do processo de espalhamento subaquático na deriva das manchas para derrames em profundidade (SINTEF, 2014).

No modelo OSCAR destacam-se as aplicações de contingência e a capacidade de modelação de operações de combate, uma vez que é um modelo especialmente concebido e direcionada para este efeito.

3.3.3 Plataforma MARPOCS

A MARPOCS tem como objetivo de implementar um modelo comum para preparação e resposta a derrames HC e HNS no Atlântico Nordeste. O projeto envolve autoridades nacionais, regionais e locais de todos os países do acordo, a Agência Africana de Segurança Marítima (AMSSA) e a empresa de controlo do tráfego marítimo *Marine Traffic*.

A plataforma encontra-se em desenvolvimento através da partilha de conhecimento e experiências entre os parceiros e autoridades dos países acordantes, procurando fortalecer a capacidade de assistência mútua, de planeamento e resposta em episódios de poluição accidental nas regiões transfronteiriças.

A plataforma disponibiliza diferentes modelos consoante a região escolhida, para Portugal continental encontram-se disponíveis os seguintes modelos:

- *Hidro MOHID* (ou *MOHID Water*) do IST;
- *Waves WW3* do IST;
- *Meteo WRF* da National Center for Atmospheric Research dos EUA.

O Hidro MOHID é o modelo utilizado pelo SCPM. Trata-se de um modelo numérico tridimensional desenvolvido para simular massas de água (oceanos, estuários, reservatórios), apresentando diversas aplicações no mercado nacional e

internacional. Das diversas áreas abrangidas pelo modelo, destaca-se a dos derrames de HC e de HNS desenvolvida para a previsão e simulação da trajetória e dos processos de transformação do óleo derramado (considerando o óleo como um grande número de partículas em movimento, independentes da água). A simulação é feita ao longo da coluna de água, e integra os processos de evaporação, dispersão, espalhamento, sedimentação, dissolução, emulsificação, dispersão e a retenção costeira (MOHID, s.d.).

A plataforma permite a simulação de derivas e visualização imediata no sistema de mapas. O utilizador tem uma área de simulação onde pode concretizar e processar as suas próprias simulações. Apesar do principal objetivo ser os derrames, a plataforma calcula deriva para corpos humanos (aferindo se se trata de afogamento ou não) e objetos flutuantes (como por exemplo contentores, exigindo a percentagem de objeto imerso).

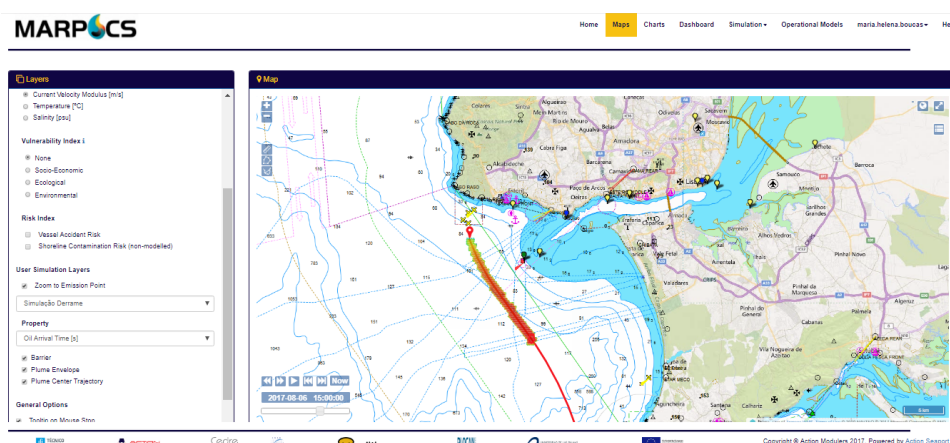


Ilustração 15 - Exemplo apresentação de resultados – Plataforma MARPOCS [Fonte: MARPOCS, 2017]

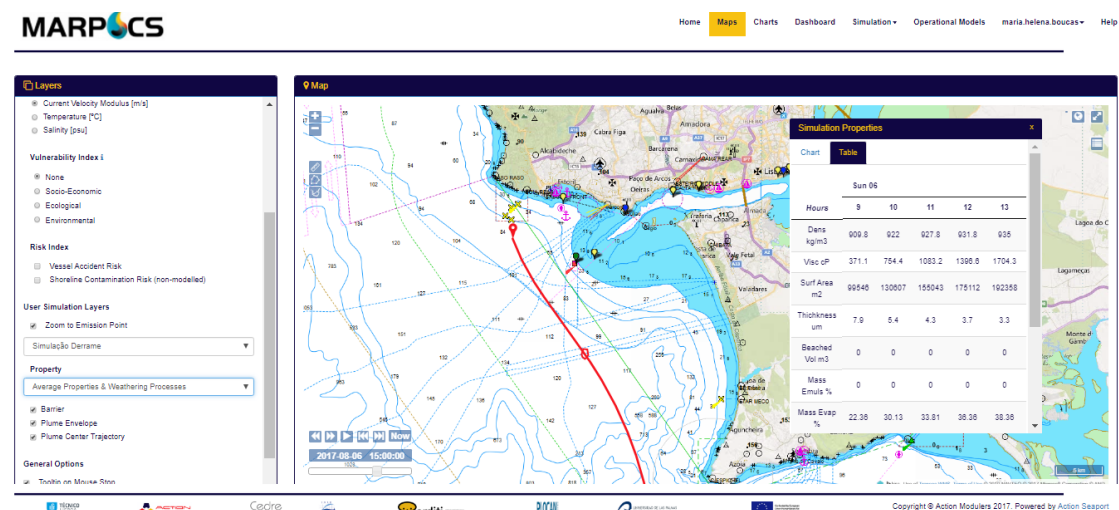


Ilustração 16 - Exemplo apresentação de resultados, com tabela de propriedades do óleo – Plataforma MARPOCS [Fonte: MARPOCS, 2017]

Futuramente, a plataforma espera integrar um sistema de previsão automática de derrames no mar através da ligação a serviços automáticos de vigilância marítima existentes, como o CLEANSEANET da EMSA.

Apesar das inúmeras mais-valias desta plataforma, tanto do ponto de vista operacional como tecnológico, é ainda um projeto em desenvolvimento. Por enquanto, a MARPOCS apresenta-se como uma plataforma não testada nem validada e com limitações ainda por resolver. Como, por exemplo, o facto de não se encontrar coberta toda a área marítima abrangida pelo acordo, incluindo a região do arquipélago dos açores.

Capítulo 4 – Análise do Modelo de Deriva do Instituto Hidrográfico

4.1 Origem do modelo DERIVA

Foi com o objetivo de prever as trajetórias de deriva de naufragos, no âmbito do SAR, que a Divisão de Oceanografia (DO) do IH iniciou o seu percurso na criação de um modelo próprio para cálculo de deriva superficial, o modelo DERIVA. Para melhor compreender as origens e o percurso do modelo apresentado, a procurámos as informações, por via de correio eletrónico, com a Doutora Catarina Clemente, uma das colaboradoras no desenvolvimento do modelo na sua fase inicial.

O Modelo segue uma física simples, assente no cálculo da corrente de superfície baseada na dinâmica da Espiral de Ekman. O algoritmo do Modelo de Deriva do IH, é corrido no *software* de cálculo numérico *MathWorks* (MATLAB) e, ao longo dos anos, sofreu diversas atualizações, sendo possível reconhecer três estágios primordiais.

- (1) A versão inicial do Modelo era bastante primitiva. O cálculo da deriva estava condicionado aos coeficientes de atrito de uma embarcação à vela e os dados de velocidade e direção do vento utilizados para os cálculos tinham de ser inseridos manualmente no código de cada vez que este era aplicado. Além disso, o algoritmo era apenas capaz de calcular a deriva para um ponto inicial.
- (2) O marco seguinte na evolução do Modelo deu-se aquando do desaparecimento de um praticante de *windsurf* junto à Baía de Cascais, encontrado três dias mais tarde ao largo do Cabo Espichel. Nessa altura, foram introduzidos alguns parâmetros de corrente costeira e introduzidos os coeficientes de atrito associados a uma prancha de *surf*.
- (3) O último grande marco impulsionador de melhorias no modelo decorreu do grande derrame de hidrocarbonetos causado pelo navio mercante “Prestige”, petroleiro de 243 metros, que transportava 77 000 toneladas de fuel, ao largo do Cabo Finisterra, em novembro de 2002 (Ezequiel, 2003). Este acidente foi acompanhado de perto pelo IH, tendo sido criada uma estrutura operacional interna unicamente “destinada a

assegurar a aquisição, processamento, produção e disseminação de informação técnico-científica” (Ezequiel, 2003).



Ilustração 17 - Afundamento do navio mercante "Prestige", em 05/07/2017 [Fonte: Worldpress, 2015]

Da aplicação do Modelo em (3), apesar de se ter conseguido “de uma forma operacional, disponibilizar previsões de deriva em curto intervalo de tempo, com resultados bastante positivos no respeitante ao rigor das previsões” (Ezequiel, 2003), foram detetadas algumas limitações e introduzidas significativas melhorias:

- Criação da interface em MATLAB, deixando de ser necessário a introdução das variáveis diretamente no algoritmo;
- Definidos mais tipos de objetos derivantes, passando a ser possível escolher entre: Objeto desconhecido, Derrame de óleo, Veleiro, Homem no mar, Superfície vélica e imersa muito baixa, Superfície vélica superior à imersa e Superfície vélica inferior à imersa;
- Desenvolvida ferramenta de leitura automática dos dados de velocidade e direção do vento fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA);
- Apresentação de prognóstico de previsão de deriva para três dias.

Posteriormente, não foram realizadas mais alterações ao modelo. O algoritmo utilizado, atualmente, data de junho de 2003 sendo apresentado como a versão 1.1. Sendo que ao longo dos seguintes anos, o modelo tem sido alvo de

vários testes e validações permitindo conferir ao modelo um grau de confiança razoável.

4.2 Âmbito do Modelo

O Modelo de Deriva do IH é aplicado em dois âmbitos distintos. É, obviamente, aplicado no âmbito do combate à poluição do mar por hidrocarbonetos, no cálculo e previsão de deriva das manchas. E, principalmente, sendo este o originador do modelo, no âmbito da Busca e Salvamento Marítimo.

Não descurando a importância dos derrames de hidrocarbonetos, o principal âmbito do Modelo de Deriva do IH, e mais solicitado, é o da Busca e Salvamento Marítimo. O Sistema Nacional para a Busca e Salvamento marítimo, é responsável pela salvaguarda da vida humana no mar, sendo esta uma responsabilidade de âmbito nacional e internacional, do Estado Português¹⁶. Neste sentido, o IH assegura um serviço permanente para o cálculo da deriva, capaz de disponibilizar a qualquer altura produtos para toda a ZEE. Os derrames de hidrocarbonetos apresentam efeitos devastadoras, contudo, nenhum superior à perda de vidas humanas.



Ilustração 18 - Centro de Coordenação de Busca e Salvamento Marítimo de Lisboa (em cima) e área das Regiões de Busca e Salvamento Nacionais - SRR Lisboa e SRR Santa Maria (em baixo) [Fonte: Marinha, 2017]

¹⁶ Decreto-Lei nº 15/94, de 22 de Janeiro

Em ambas as aplicações, a informação oriunda do IH é disponibilizada para o centro de coordenação de busca e salvamento¹⁷ (*Maritime Rescue Coordination Center* (MRCC)) com jurisdição sobre a zona do incidente que por sua vez a distribui pelas restantes entidades envolvidas. O fornecimento dessa informação aos condutores das ações (SAR e de combate à poluição) é fundamental e indispensável. A informação disponibilizada tem de ser rápida e fidedigna, dado que detém um elevado impacto no decorrer da missão pois influencia aspetos como a escolha dos meios, a movimentação dos meios, o tempo disponível para atuar e, fundamentalmente, o desfecho da ação.

Importa reconhecer a relevância das áreas de atuação do modelo a analisar e constatar que se trata de áreas sensíveis, de interesse a nacional, das quais podem resultar impactos devastadores tanto a nível humano, no âmbito da Busca e Salvamento Marítimo, como a nível ambiental, económico e social, no âmbito dos derrames de hidrocarbonetos no mar.

4.3 Aplicação do Modelo

No âmbito do combate à poluição do mar por hidrocarbonetos, o cálculo da deriva é, salvo raras exceções¹⁸, solicitado pelo MRCC Lisboa ou Delgada no seguimento da ativação de um mecanismo de alerta. Os mecanismos de alerta para acidentes desta natureza podem advir de diversas entidades e circunstâncias: podem resultar de voos de patrulhas das aeronaves da Força Aérea Portuguesa (FAP), de avistamentos por parte da aviação civil, por embarcações de pesca ou recreio e do sistema de alertas do programa *CleanSeaNet* da EMSA (um sistema de monitorização satélite que assegura uma cobertura contínua sobre a europa¹⁹) (AMN, s. d.).

¹⁷ Os MRCC's Lisboa e Delgada assim com o Comando de Operações Marítimas (COMAR) acumulam a função de entidade nacional que recebe os alertas nacionais e internacionais para derrames de hidrocarbonetos. São exemplo, os relatos de derrame fornecidos pela Agência Europeia de Segurança no Mar (EMSA), no âmbito o programa *CleanSeaNet*.

¹⁸ O cálculo da deriva pode ser solicitado no âmbito de exercícios de validação de modelos e/ou em exercícios de treino.

¹⁹ No anexo XX da presente dissertação encontra-se um exemplar de um relatório de alerta do *CleanSeaNet*.

Uma vez recebido um alerta no MRCC, este contacta com o IH e solicita uma previsão de deriva. Este pedido deve vir acompanhado de um Grupo-Data-Hora (GDH) do incidente e de uma posição de início do derrame. Com estes dados, o oficial do IH responsável por assistir aos pedidos de deriva executa os procedimentos necessários de modo efetuar o cálculo da previsão de deriva.

O processo de obtenção da previsão de deriva inicia-se com a obtenção dos dados meteorológicos. Em concreto, o campo de ventos à superfície atualizado e a previsão até 72 horas para a posição fornecida. Para tal, os dados são obtidos através de um programa de pré-processamento (ferramenta de leitura automática dos dados de velocidade e direção do vento, referido anteriormente) de onde são retirados, de ficheiros meteorológicos provenientes do IPMA, os dados necessários para o cálculo da previsão. Os dados finais para inserção no modelo da deriva são apresentados num documento de texto (.txt), como mostrado na Ilustração 19.

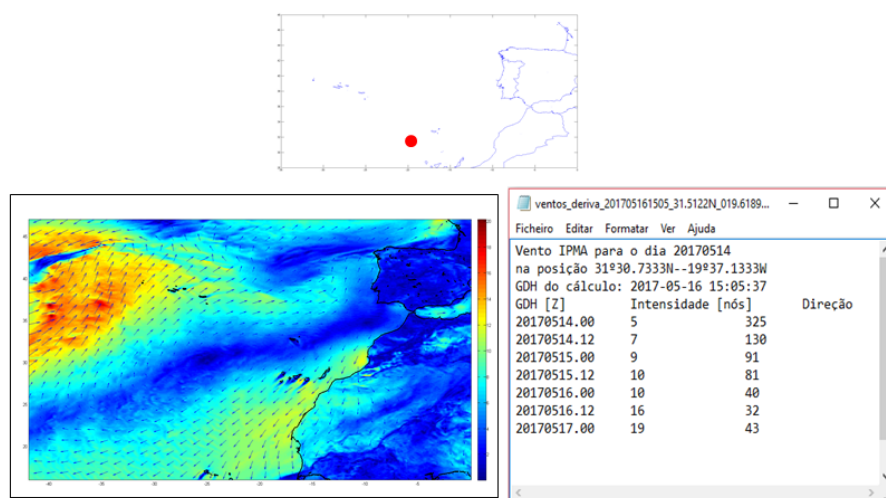


Ilustração 19 – Ficheros obtidos do processamento dos dados meteorológicos para o cálculo da Deriva (em cima: Posição do acidente, à esquerda: Intensidade e Direção do vento nas SRR Portuguesas, à direita: Ficheiro de compilação de dados de vento para cálculo da deriva)

Encontram-se reunidos os requisitos para utilização do modelo de cálculo da deriva. Contudo, é ainda necessário proceder à transcrição manual dos valores obtidos para o modelo (Ilustração 20).



Ilustração 20 - Processo de preenchimento dos campos do Modelo de Deriva do IH (à esquerda: Interface inicial do Modelo; à direita: Interface de introdução de dados (campos por preencher), em baixo: Interface de introdução de dados (com campos preenchidos))

Decorrente do preenchimento e submissão dos dados, o Modelo efetua o cálculo. O modelo calcula uma previsão de deriva até 48h com intervalos de 8 horas entre posições estimadas. Os resultados são obtidos, instantaneamente, e apresenta resultados em dois formatos:

- **Imagem:** Representação geográfica da previsão de deriva do objeto (posição geográfica ao longo do tempo), do vento à superfície e da corrente à superfície (Intensidade e direção ao longo da trajetória prevista) (Ilustração 21);
- **Documento de texto (.txt):** Descrição escrita dos resultados, inclui compilação da informação inicial introduzida para cálculo da deriva (Nome do Operador, tipo de objeto à deriva, posição inicial, GDH inicial e condições iniciais de vento) e os resultados da previsão de vento e de corrente à superfície em função das posições da trajetória calculada, apresentada em colunas (Ilustração 22).

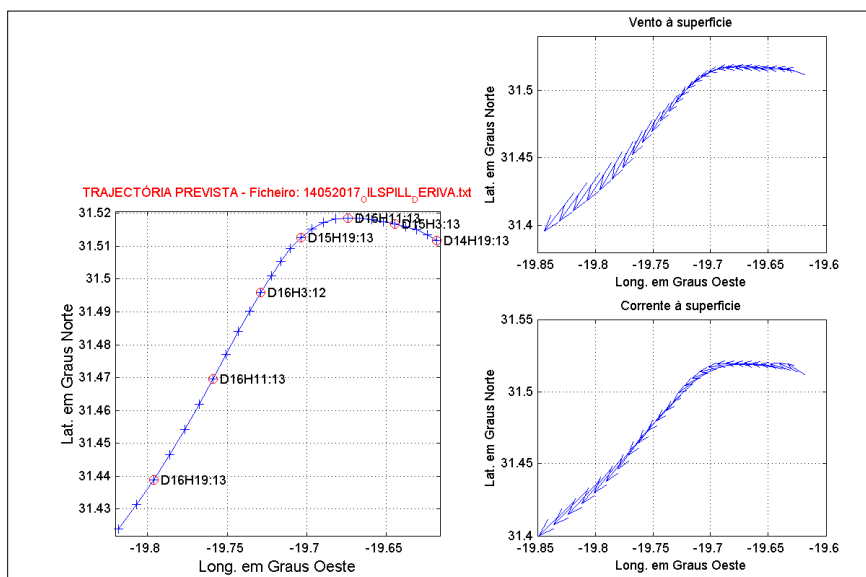


Ilustração 21 – Apresentação dos resultados do cálculo da deriva do modelo DERIVA, em formato imagem

```

14052017_OILSPILL_ERIVA - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
% Marinha-Instituto Hidrográfico - Div. Oceanografia
16-May-2017 % Nome do operador: ASPREISBOUCAS%
DADOS DE ENTRADA PARA A DERIVA SUPERFICIAL%
Superfície imersa muito baixa (Derrames de Óleos)%
Latitude inicial (º) = 31 30.7%
Longitude inicial (º) = -19 37.1%
Grupo data/hora inicial = 2017-5-14 19:13%
Salto temporal (h) = 2%
Condições iniciais de vento%
Hora(h) Int.(nós) Dir.(º)%
0 5 325%
12 7 130%
24 9 91%
36 10 81%
48 10 40%
60 16 32%
72 19 43%
Resultados: direcção do vento em convecção Oceanográfica .%
RESULTADOS: POSIÇÃO(deg) GDH CORR.SUP.(INT(nós) DIR(deg)) VENTO SUP.(INT(nós) DIR(deg)).%
LATG LATM LONG LONM LAT LON ANO MES DIA HORA MIN CINT CDIR VINT VDIR.
31 30.7 -19 37.1 31.512 -19.618 2017 5 14 19 13 0.160 296.546 8.178 286.54631
30.8 -19 37.5 31.514 -19.624 2017 5 14 21 13 0.166 290.046 8.510 280.04631
30.9 -19 37.9 31.515 -19.631 2017 5 14 23 13 0.173 283.546 8.843 273.54631
31.0 -19 38.3 31.516 -19.638 2017 5 15 1 13 0.177 279.986 9.074 269.98631
31.0 -19 38.7 31.517 -19.645 2017 5 15 3 13 0.181 278.319 9.240 268.31931
31.1 -19 39.1 31.518 -19.652 2017 5 15 5 13 0.184 276.653 9.406 266.65331
31.1 -19 39.6 31.518 -19.659 2017 5 15 7 13 0.187 274.986 9.572 264.98631
31.1 -19 40.0 31.518 -19.667 2017 5 15 9 13 0.190 273.319 9.739 263.31931
31.1 -19 40.5 31.519 -19.674 2017 5 15 11 13 0.194 271.653 9.905 261.65331
31.1 -19 40.9 31.518 -19.682 2017 5 15 13 13 0.195 266.843 9.970 256.84331
31.0 -19 41.4 31.517 -19.689 2017 5 15 15 13 0.195 260.010 9.970 250.01031
30.9 -19 41.8 31.515 -19.697 2017 5 15 17 13 0.195 253.176 9.970 243.17631
30.8 -19 42.2 31.513 -19.704 2017 5 15 19 13 0.195 246.343 9.970 236.34331
30.6 -19 42.6 31.509 -19.710 2017 5 15 21 12 0.195 239.510 9.970 229.51031
30.3 -19 43.0 31.505 -19.716 2017 5 15 23 13 0.195 232.676 9.970 222.67631
30.1 -19 43.3 31.501 -19.722 2017 5 16 1 13 0.207 229.189 10.576 219.18931

```

Ilustração 22 – Apresentação dos resultados do cálculo da deriva do modelo DERIVA, em formato documento de texto (.txt)

Após obtidos os resultados, a informação é analisada pelo oficial do IH que, de seguida, procede ao envio dos mesmos para o MRCC (são enviados ambos os ficheiros obtidos, a imagem e o documento de texto). Fica assim concluído o conjunto de ações a realizar pelo oficial responsável.

4.4 Metodologia do Modelo

O Modelo de Deriva do IH é um modelo de partículas bidimensional de superfície para previsão de trajetória de deriva de objetos no mar. Como referido anteriormente, o algoritmo do Modelo calcula a deriva superficial para diversos objetos com base nas equações da Teoria da Espiral de Ekman, para o cálculo da corrente e de deriva superficial. Tendencialmente, o desenvolvimento deste tipo de modelo é feito segundo módulos. Contudo, importa referir que, o modelo DERIVA, além de não ser composto por módulos, foi desenvolvido e melhorado de forma empírica ao longo dos anos. No presente subcapítulo pretende-se abordar os métodos e formulações utilizados nos cálculos do modelo apresentado, abordando duas componentes: integração da Teoria de Ekman e o cálculo da previsão de trajetória de deriva. A seguinte abordagem será feita num âmbito geral da aplicabilidade do modelo e não restringido ao universo dos derrames de HC.

Integração da Teoria de Ekman – Espiral de Ekman

As formulações da Espiral de Ekman descrevem a velocidade e direção da corrente ao longo da coluna de água. O modelo de Ekman assume que o efeito da força do vento sobre a superfície da água origina movimento ao longo de toda uma coluna de água uniforme. Esse movimento devido ao efeito da força de Coriolis é defletido, à superfície, 45 graus para a direita (no hemisfério norte²⁰) em relação à direção do vento. O movimento induzido na camada superficial afeta, igualmente, as camadas inferiores, sendo que a energia do vento se dissipa ao longo da coluna de água. A Espiral de Ekman considera que a velocidade da corrente diminui com o aumento da profundidade, e que o efeito de Coriolis aumenta. A cada camada

²⁰ O efeito da força de Coriolis no hemisfério sul provoca deflexão para o lado esquerdo.

colocada em movimento, a corrente apresenta progressivamente menor velocidade e maior deflexão para a direita que a camada anterior (Thurman, 2010).

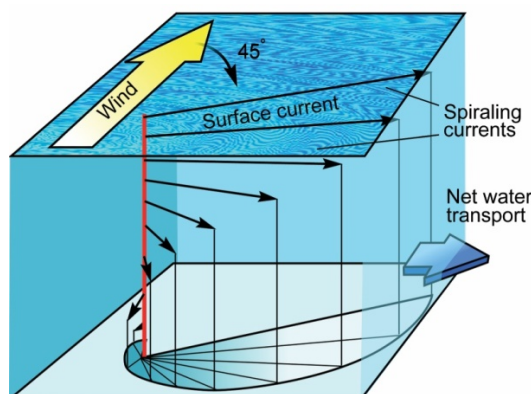


Ilustração 23 - Esquema da Espiral de Ekman [Fonte: THURMAN, 2004]

As equações de Ekman permitem obter valores de corrente e deriva superficial a partir unicamente do vento à superfície. No entanto, estas equações apresentam algumas limitações que por sua vez resultam em condicionantes na aplicação e resultados do modelo DERIVA, tais como:

- As equações consideram condições constantes de vento à superfície, situação rara no meio marítimo. Estas variações meteorológicas podem resultar em ângulos de deflexão ligeiramente diferentes dos apresentados entre vento e corrente na coluna de água, bem como na variação da deriva superficial dos objetos em estudo.
- A estabilidade da Espiral de Ekman é também afetada pela variação da profundidade e pela proximidade a costa. O aumento de fatores influenciadores e condicionadores, como redução da profundidade, presença de correntes costeiras, de maré ou de desembocadura de rios

Cálculo da previsão da trajetória de deriva

O método utilizado nesta fase de cálculo é simples e está, obviamente, dependente aos dados iniciais fornecidos pelo utilizador. O modelo DERIVA utiliza todos os dados introduzidos pelo utilizador (os dados de vento, o tipo de objeto à deriva e a posição inicial) e os dados de corrente de superfície posteriormente calculados para obter a previsão de trajetória de deriva do objeto em estudo.

Como referido anteriormente, os primeiros estudos calculavam a deriva de manchas derramadas através da parametrização do vento e da corrente (Azevedo, 2010). É exatamente esse o processo utilizado no modelo DERIVA.

O modelo aplica percentis de influência à intensidade e direção do vento e da corrente para cálculo da deriva em função do objeto selecionado para previsão da trajetória de deriva. O tipo de objeto à deriva é considerado para aplicação de um coeficiente empírico que intensifica ou reduz o efeito do vento sobre o objeto à deriva, em função da área vélica exposta. Seguidamente, a trajetória é associada à posição inicial e apresentada a previsão de deriva do objeto.

4.5 Comparação com outros modelos

De modo a prosseguir a análise do modelo de deriva superficial do IH, e enquadrar as suas características e resultados no contexto da modelação operacional atualmente existente, pretende-se no presente subcapítulo apresentar uma comparação geral do modelo em estudo com os modelos apresentados no capítulo anterior. Sendo de salientar que os dois primeiros, os modelos OILMAP e OSCAR, são modelos reconhecidos internacionalmente, suportados por empresas e organizações de renome, sustentados em sistemas modernos em constante desenvolvimento e melhoramento. Também a plataforma MARPOCS, apesar de ainda em desenvolvimento, sendo fruto de um trabalho internacional e coadjuvado pela contribuição de parceiros com experiência na área da modelação apresenta condições favoráveis ao desenvolvimento e aperfeiçoamento da plataforma.

A comparação será feita de acordo com três estágios fundamentais:

- Acoplação de informação;
- Aplicação de modelos e formulações nos cálculos do modelo;
- Apresentação dos resultados.

Apesar de altamente interligadas e encadeadas, estas etapas marcam fases no processo de modelação e distinguem-se entre si não só pelos diferentes níveis de complexidade, na modelação e computação, como pelos diferentes utilizadores-alvo. Destacando-se a apresentação de resultados em que a disponibilização e

apresentação da informação têm de se encontrar ao alcance dos utilizadores finais, muitas vezes técnicos não especializados.

Acoplação de informação

Como exposto anteriormente, são vários os fatores que influenciam os derrames de HC, quer sejam no âmbito das alterações físicas e químicas como no da propagação e movimentação da mancha de óleo. Numa situação ideal, seriam considerados todos os fatores passíveis de serem medidos e registados, no momento da deteção e alerta de um derrame, nos cálculos do modelo. Contudo, isso traria não só um aumento da complexidade de formulação como um elevado peso computacional. Situação a evitar em modelos de previsão operacional em que, como já referido, se pretende respostas rápidas e com um grau de rigor, apesar de elevado, não com demasiada minúcia.

Nesta componente de acoplação de informação, distinguem-se dois tipos de informações essenciais:

- Informação relativa ao derrame;
- Informação meteorológica e oceanográfica da área do incidente.

No âmbito do primeiro ponto, os modelos mencionados apresentam todos a possibilidade alimentar o sistema com as seguintes informações:

- ✓ Tipo de óleo ou, inclusivamente, identificação do óleo de acordo com tabelas de dados de óleos oficiais²¹;
- ✓ Quantidade de óleo derramado;
- ✓ Tipo de derrame: instantâneo ou contínuo; solicitando, caso se aplique, o fluxo de descarga;

Paralelamente, no modelo DERIVA o cálculo da deriva superficial de uma mancha de óleo é apenas limitado pela escolha da opção “Derrame de óleo”, aquando da escolha do objeto à deriva. Para o efeito, o modelo considera que se trata de um objeto à deriva com uma área imersa muito baixa. Sendo perdida, nesta fase, a possibilidade de integração de informação relativa ao derrame e ao óleo.

²¹ A plataforma MARPOCS, por exemplo, integra uma base de dados de óleos da NOAA.

Relativamente ao segundo ponto, integração de informação meteorológica e oceanográfica, os modelos apresentados integram combinação de dados meteorológicos e oceanográficos como o vento, a corrente e a agitação marítima. Como referido anteriormente, a plataforma MARPOCS, por exemplo, permite ao utilizador seleccionar, consoante a área do acidente, o modelo meteorológico a aplicar na simulação.

Em contrapartida, o modelo DERIVA utiliza apenas dados de vento que, além de exigir introdução manual, são referentes apenas à posição inicial do incidente. O que significa que ao longo do cálculo da previsão de deriva, o modelo aplica ao longo da trajetória calculada sempre o campo de ventos, correspondente à posição inicial. Calculando a corrente de superfície a partir do campo de ventos disponibilizado, e não incluindo a agitação marítima para o cálculo da deriva. A introdução manual de dados meteorológicos acarreta, ainda, uma demora no processo de cálculo da deriva, bem como um aumento de probabilidade de erros na introdução dos mesmos, pelo utilizador.

Após assegurada a etapa de acoplação de informação, os modelos operacionais ficam aptos a aplicar os seus algoritmos e efetuar os cálculos para obtenção das previsões operacionais.

Aplicação de modelos e formulações nos cálculos do modelo

Esta é a etapa que envolve mais complexidade, pois abrange os modelos e formulações desenvolvidos para integrar os dados meteorológicos, os processos de transformação no transporte do óleo e da mancha. A integração dos processos de transformação nos modelos operacionais tem um grande impacto nos produtos finais dos modelos. Resultando em modelos mais completos e conferindo-lhes mais rigor e aproximação à realidade.

Nesta fase, apesar de inteiramente relacionadas, distinguem-se duas componentes importantes a considerar:

- Processos de transformação do óleo;
- Deriva da mancha.

Os modelos apresentados integram processos de transformação do óleo.
Resumindo:

- ✓ OILMAP: Evaporação espalhamento, emulsificação e retenção costeira;
- ✓ OSCAR: Evaporação, espalhamento, dissolução, emulsificação e dispersão;
- ✓ MARPOCS: Evaporação, dispersão, espalhamento, sedimentação, dissolução, emulsificação, dispersão e retenção costeira.

A integração destes processos permite aos modelos complementar os resultados finais com previsões complementares como: alterações de estado da mancha e do óleo, variações de densidade, viscosidade, volume, entre outros. Este tipo de previsões tem um grande impacto no apoio às operações de combate, como na escolha do tipo de dispersante ou do meio de recolha, ambos altamente dependentes da viscosidade do óleo.

Os restantes modelos apresentam todos a capacidade de cálculo da deriva, transporte ou deslocação da mancha. Sendo que, dependendo dos seus módulos complementares, o resultado final apresentado é mais básico ou completo. Podendo resultar na apresentação de previsões de trajetória, estado e área da mancha, ponto de contacto em terra, análise de sensibilidade dos pontos de contacto mais próximos, entre outros.

O modelo DERIVA não foi originalmente concebido para modelar derrames de HC, como tal, o seu algoritmo, não atenta a nenhum processo de transformação sofrido pelo óleo após um derrame. Apesar de disponibilizar a opção, na escolha do objeto à deriva, este serve apenas para condicionar a parametrização dos fatores envolvidos, efetua os cálculos considerando as manchas de óleo como uma partícula em suspensão na água com uma superfície imersa muito baixa.

Em cenários de operação anteriores, como foi o caso do derrame causado pelo navio mercante “Prestige”, de modo a colmatar a limitação do modelo de apenas obter derivas pontuais, foram realizadas previsões através da compilação de resultados de cálculos simultâneos considerando posições extremas da mancha, obtidas por observação aérea. Apresentando-se como um método que, apesar de requerer maior tempo de cálculo e envolvimento humano, foi capaz de responder às necessidades e apresentar resultados benéficos para o controlo operacional.

Apresentação de resultados

A apresentação de resultados é uma componente crucial num modelo operacional para derrames de HC. Um sistema de modelação de derrames de HC pode ser capaz de calcular e modelar inúmeros contextos e parâmetros de um derrame de HC, no entanto, é essencial que os seus resultados sejam disponibilizados e apresentados de forma clara e objetiva. Caso contrário, poder-se-á comprometer a interpretação dos resultados e, conseqüentemente, o empenhamento e movimentação dos meios nas operações de combate. A forma como os resultados são apresentados tem um grande impacto na condução das operações de combate.

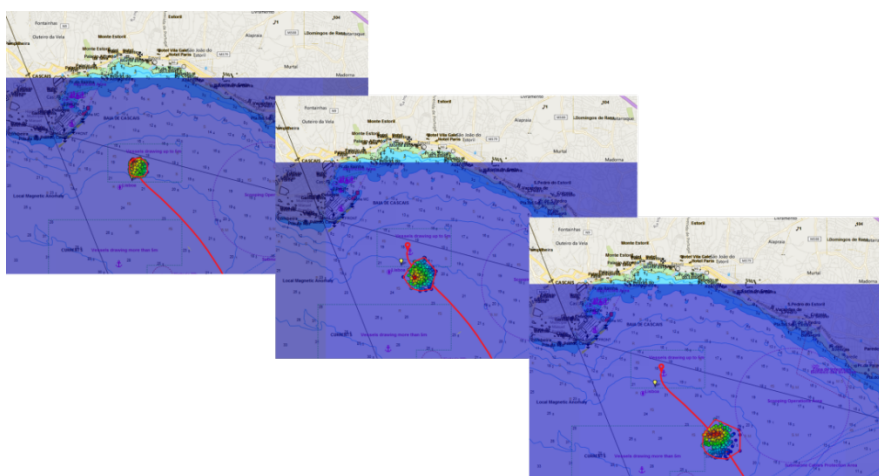


Ilustração 24 - Apresentação de resultados plataforma MARPOCS [Fonte: MARPOCS, 2017]

Os modelos OILMAP e OSCAR, bem como, a plataforma MARPOCS apresentam os seus resultados de forma interativa e dinâmica, com recurso a *softwares* SIG. Estes permitem ao utilizador manipular os dados e a forma como estes são apresentados, controlar parâmetros e seleccionar as camadas de informação, bem como a visualização animada em função do tempo (Ilustração 24 e Ilustração 25).

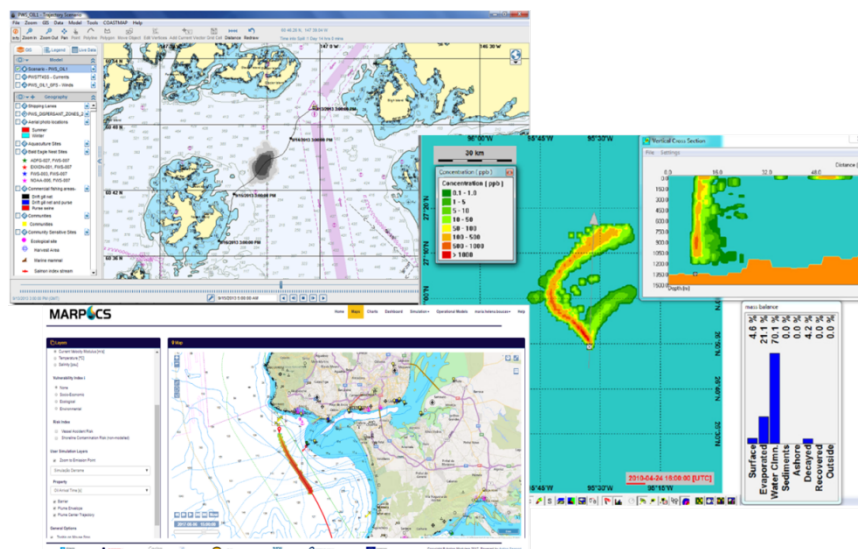


Ilustração 25 - Exemplos de Apresentação de Resultados dos modelos estudados (lado esquerdo, em cima: modelo OILMAP; lado esquerdo em baixo: plataforma MARPOCS; lado direito: modelo OSCAR)

Os resultados do modelo DERIVA já foram apresentados anteriormente (Ilustração 26) e, nesta fase, tal como nas anteriores, as diferenças entre o modelo DERIVA e os restantes modelos é significativa.

Uma limitação do modelo DERIVA prende-se com o facto de não permite ao utilizador a interação com os resultados nem a alteração dos resultados iniciais para obtenção de novas previsões. Caso se obtenha novas informações relativas ao derrame como, por exemplo, uma posição atualizada da localização da mancha é necessário repetir todo o processo de aplicação do modelo e posterior envio dos novos resultados. Contudo, apesar das limitações o modelo DERIVA tem provado ao longo ser capaz de produzir resultados capazes de apoiar a tomada de decisão no combate à poluição no mar. De modo a analisar e aferir a importância, eficiência e o nível de satisfação com a apresentação de resultados do modelo DERIVA, de acordo com a realidade e contexto operacional em que é aplicado, foram aplicados questionários a alguns dos intervenientes diretos nas ações de combate à poluição por HC, como utilizadores diretos da informação fornecida. Os resultados dessa análise serão apresentados no subcapítulo seguinte.

Assim, de modo a finalizar a comparação do modelo DERIVA com os restantes modelos é apresentada a Tabela 2 com o resumo das características gerais dos modelos apresentados. Mais uma vez, importa referir as discrepâncias existentes

entre os modelos, tanto a nível tecnológico, computacional, organizacional como económico.

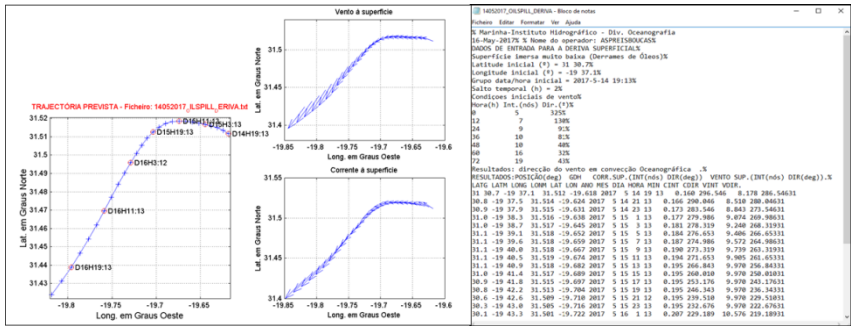


Ilustração 26 - Apresentação dos Resultados do modelo DERIVA (lado esquerdo: imagem, lado direito: documento de texto)

Tabela 2 – Esquema comparativo dos modelos estudados

		OILMAP	OSCAR	MARPOCS	DERIVA
Acoplação de informação	Informação do Derrame	✓	✓	✓	✗
	Informação meteorológica e oceanográfica	✓	✓	✓	✗
Aplicação de modelos e formulações	Processos de transformação do óleo	✓	✓	✓	✗
	Deriva da mancha	✓	✓	✓	✓
Apresentação de resultados	Referência geográfica	✓	✓	✓	✓
	Referência cartográfica	✓	✓	✓	✗
	Seleção da informação apresentada	✓	✓	✓	✗
	Visualização do derrame em função do tempo	✓	✓	✓	✗

4.6 Opinião dos utilizadores do modelo do IH

De modo a concluir a análise do modelo DERIVA procurou-se investigar, junto dos utilizadores diretos dos resultados do programa, qual a sua apreciação relativamente aos resultados do modelo. Para o efeito, foi utilizada a plataforma de questionários *on-line* da marinha portuguesa, e contou-se com a participação de onze elementos, direta ou indiretamente, ligados à condução de operações de

combate à poluição no mar. O grupo de inquiridos incluiu capitães do porto, elementos das brigadas de combate à poluição e elementos do SCPM, sendo que 70% dos elementos já conduziu ações reais de combate à poluição no mar.

Relativamente ao serviço prestado pelo Instituto Hidrográfico, questionou-se qual a importância do cálculo da previsão de deriva de uma mancha de óleo (Ilustração 27):

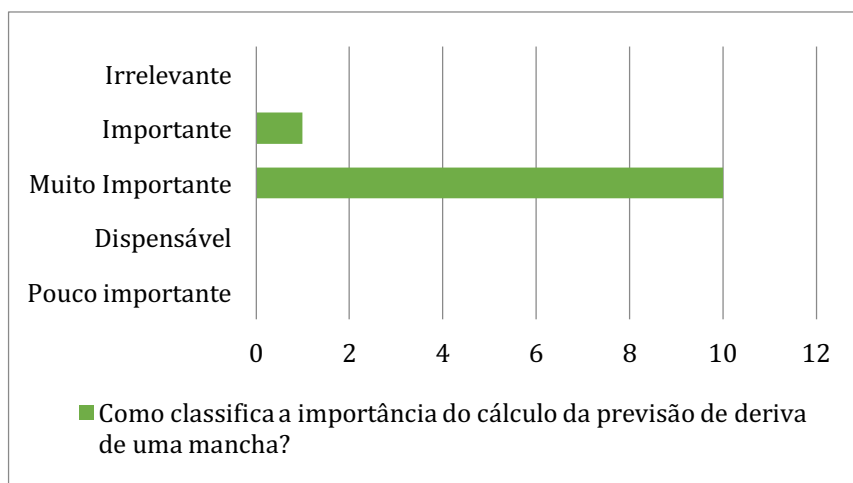


Ilustração 27 - Importância do cálculo da previsão de deriva de uma mancha

A maioria dos inquiridos considerou o cálculo da deriva muito importante e justificou a sua resposta com o impacto que tem na movimentação antecipada dos meios de combate e na proteção de zonas sensíveis.

De seguida, procurou-se apurar qual a classificação dada à informação disponibilizada pelo modelo do IH (Ilustração 28):

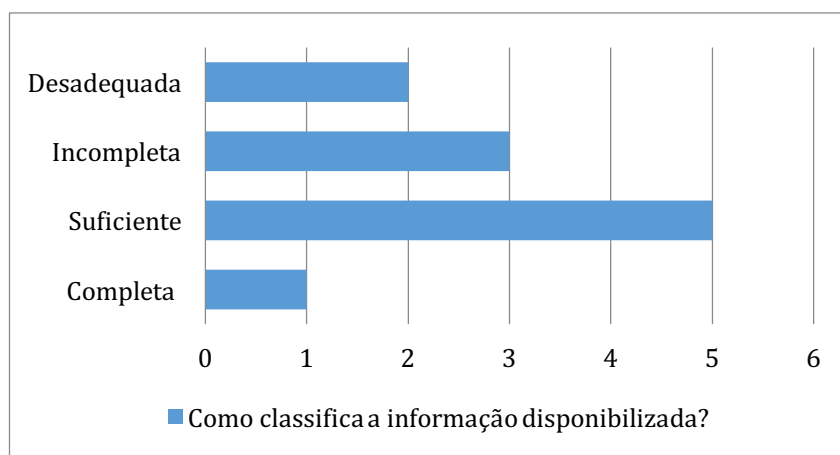


Ilustração 28 - Classificação da informação disponibilizada pelo modelo do IH

Desta vez, as opiniões divergiram, apesar de o maior número de respostas corresponde à classificação Suficiente (cinco elementos), 45% dos inquiridos considera a informação desadequada ou incompleta. Na justificação das classificações foram apresentados diversos fatores:

- Suficiente e Completa – A informação foi apontada como “útil e oportuna”, sendo ainda considerada como “fulcral nas tomadas de decisão”. Contudo, a informação foi, ainda, considerada “adequada, no entanto deverá ser sempre atualizada com as novas tecnologias” e como “informação geralmente correta se não entrarmos com fenómenos locais”;
- Desadequada – Sendo referido que “a informação que consta do cálculo está completa, no entanto não é apresentada de uma forma graficamente expedita, como seria desejado em situações de emergência” e ainda “pouco clara e pouco evidente”;
- Incompleta – Esta classificação deveu-se essencialmente a um fator: “informação não é fornecida sobre cartografia, pelo que há todo o trabalho de transpor para saber a que local correspondem as coordenadas e distâncias à costa”, “é necessário transpor para a carta para se extrair toda a informação necessária;

Posteriormente, foi solicitada a classificação relativamente ao formato da informação disponibilizada (Ilustração 29):

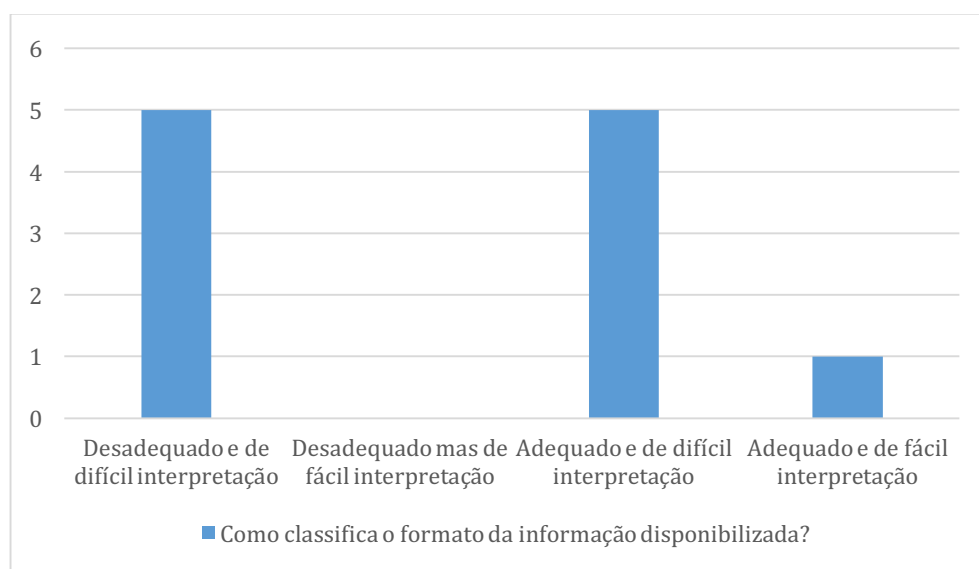


Ilustração 29 - Classificação do formato da informação disponibilizada pelo modelo do IH

Nesta questão, apesar das opiniões dividirem quanto ao facto de o formato ser ou não adequado, houve concordância relativamente à difícil interpretação da informação. Mais uma vez foi referida a mais-valia da representação cartográfica da deriva, por forma a “viabilizar uma leitura rápida”, “promover uma tomada de decisão mais rápida e expedita”.

Por último, averiguou-se que outras informações os utilizadores gostariam de ver disponibilizadas nos resultados do modelo (Ilustração 30):

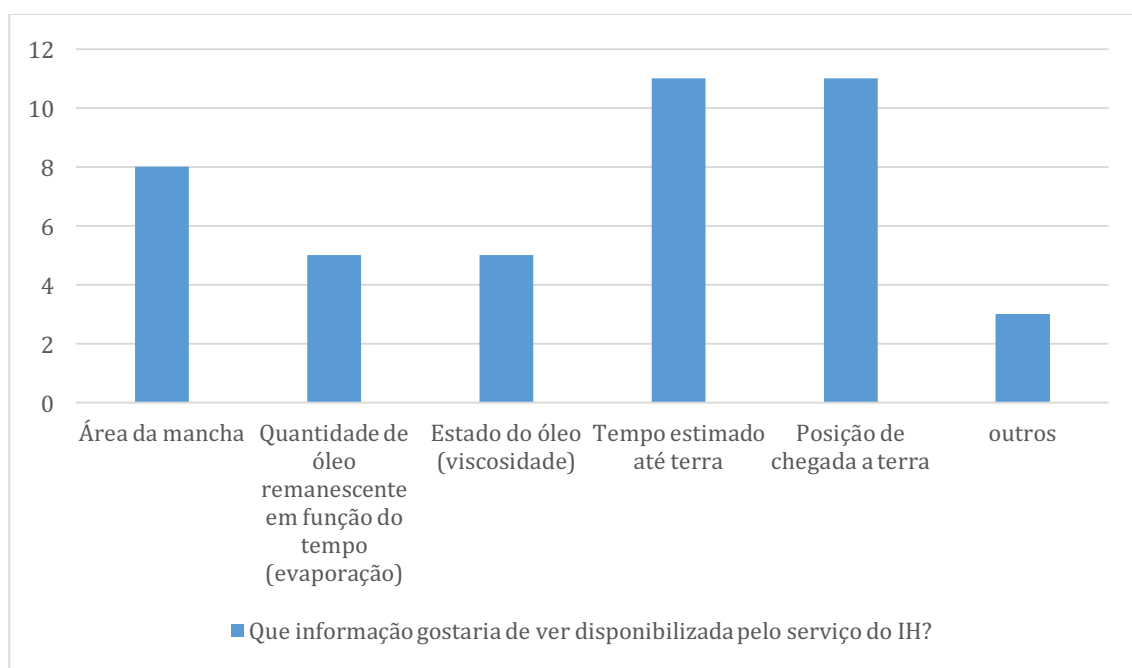


Ilustração 30 – Tipos de informação a disponibilizar no modelo do IH

Nesta questão, como seria de esperar, as informações de “tempo estimado até terra” e “posição de chegada a terra” foram escolhidas por todos os elementos, sendo que a informação relativa à “área da mancha” também foi escolhida pela maioria. Sendo mencionada, mais uma vez, a visualização sobre carta eletrónica e a possibilidade de acesso aos resultados através de aplicação para telemóveis como outras formas de disponibilização da informação.

De um modo geral, apesar de o grupo de inquiridos ser reduzido, as conclusões tiradas foram ao encontro do esperado. Comprova-se assim que, o modelo DERIVA, apesar de competente, apresenta uma enorme margem de crescimento e melhoramento.

Capítulo 5 – Discussão de Resultados

5.1 Resultados da Análise do modelo de deriva do IH

Neste capítulo, pretende-se apresentar as conclusões obtidas da análise, realizada no capítulo anterior, ao modelo de deriva do IH no âmbito da temática da modelação de derrames de HC.

Um fator primordial à apreciação do modelo é o facto deste não ser originalmente desenvolvido no âmbito da modelação de derrames de HC, mas sim para a busca e salvamento marítimo, esta particularidade explica, *a priori*, muitas das limitações científicas do modelo bem como as grandes diferenças para com os restantes modelos apresentados.

Outro fator importante é o contexto organizacional em que o modelo se insere. O IH é um órgão da Marinha Portuguesa e apresenta a abrangente missão de assegurar atividades relacionadas com as ciências e técnicas do mar, na aplicação militar e no desenvolvimento do país nas áreas científica e de defesa do ambiente marinho. As solicitações e empenhamentos do IH são bastantes e implicam a triagem e estabelecimento de prioridades.

Em todos os campos estudados, são várias as limitações detetadas. O modelo encontra-se bastante atrasado a nível científico e tecnológico, bem como a nível de procedimentos e apresentação de resultados.

Quanto ao modelo, as metodologias e formulações utilizadas são, considerando a extensão dos processos e fatores influenciadores dos derrames de HC estudados, demasiado básicas. Como exposto, ao longo da dissertação, são vários os fatores que influenciam a modelação de derrames de HC: o tipo de HC, a quantidade de óleo derramado, as características do derrame, as condições meteorológicas e oceanográficas, entre outros. As alterações físicas e químicas da mancha, apesar de apresentarem diferentes períodos de atuação e graus de relevância (Ilustração 8) são demasiado significativas para que sejam completamente suprimidas dos cálculos, assim como o tipo de óleo e a quantidade de óleo derramado. O mesmo acontece com as condições meteorológicas e oceanográficas, como principais influenciadoras da deriva das manchas, devem alimentar o modelo e os seus cálculos de forma atualizada e constante, ao contrário de se considerar sempre o

mesmo campo de ventos ao longo de uma mesma previsão. Esta característica do modelo, é crítica aquando de alterações meteorológicas, como passagem de fenómenos que alterem localmente as condições sentidas localmente.

Na aplicação do modelo e a obtenção dos resultados, apesar de envolver procedimentos relativamente simples, requerem a intervenção de pessoal especializado do IH e a introdução manual dos dados meteorológicos, não só torna o processo de resposta mais lento, como pode introduz nos resultados um fator de erro associado à introdução manual dos dados. Neste aspeto, sem dúvida que as plataformas disponíveis on-line permitem não só um acesso rápido, como também a receção direta de informação meteorológica.

Por último, através da análise dos resultados e da forma como estes são apresentados e do apuramento da opinião dos utilizadores, concluiu-se que, apesar de ser disponibilizada a informação essencial, a apresentação dos resultados pode ser fortemente melhorada de modo a tornar mais fácil a interpretação dos resultados. Um utilizador pode não ter conhecimentos aprofundados na temática dos HC e seus comportamentos, contudo, tem de ser capaz de retirar informações necessárias para a condução das operações de combate à poluição do mar de forma rápida e inequívoca.

Assim, conclui-se que o modelo de deriva do IH se encontra muito desatualizado e pouco adaptado à realidade e necessidades operacionais do combate à poluição do mar por HC. No âmbito da modelação de derrames, o modelo não considera nenhum processo de transformação dos óleos após derramados, nem nenhuma informação relativa às circunstâncias do derrame. É de salientar, a pertinência e o interesse de uma rápida intervenção de reestruturação do modelo do IH.

5.2 Sugestões de melhoria do Modelo de Deriva do IH

Do decorrer da investigação e da análise ao modelo DERIVA, são várias as limitações detetadas e inúmeras as oportunidades de melhoria identificadas. Contudo, ciente da realidade institucional e organizacional, e da impossibilidade de resolução imediata da totalidade das limitações, as sugestões de melhoria serão

apresentadas de acordo com duas realidades: sugestões de intervenção superficiais a curto-prazo e sugestões de intervenção profundas a longo-prazo. Desta forma, pretende-se encontrar e adaptar soluções passíveis de serem implementadas, sem que se cinja ao exclusivamente ideal, mais sim às circunstâncias e recursos existentes. Não desvalorizando, contudo, a importância e necessidade de desenvolvimento e melhoramento do modelo.

Sugestões de intervenções superficiais a curto-prazo

As seguintes sugestões são apresentadas no sentido de melhorar uma limitação específica detetada na análise do modelo: difícil interpretação dos resultados. Esta limitação tem impacto direto na condução e coordenação das ações de combate à poluição no mar. Assim, de modo completar parcialmente a informação disponibilizada e a facilitar a sua interpretação, sem que, para tal, seja necessário um grande empenhamento de recursos, humanos e temporais, são sugeridas as seguintes sugestões:

- Acrescentar, no gráfico da previsão de deriva, a representação da linha de costa. Desta forma, ainda que o modelo não seja indicado para cálculos junto a costa, permitiria aos utilizadores uma melhor e mais fácil interpretação dos resultados.
- Outra sugestão, seria introduzir uma estima para o tempo de deriva da mancha até ao contacto com a costa. Contudo, neste caso, devido às metodologias e formulações do modelo, tal sugestão, além de poder envolver alguma complexidade computacional, poderá resultar em resultados muito díspares da realidade.

As medidas apresentadas são apenas sugestões que visam mitigar aspetos na apresentação dos resultados, não devendo ser, portanto, consideradas como prioritárias ou mais pertinentes comparativamente às seguintes.

Sugestões de intervenções profundas a longo-prazo

Decorrente do estudo das características e condicionantes da modelação de derrames de HC, do estado da arte dos modelos operacionais apresentados e das necessidades e preferências dos utilizadores, é possível delinear parâmetros e

características gerais para a reestruturação e melhoramento do modelo DERIVA, no sentido de se enquadrar no âmbito da modelação de derrames de HC e do apoio às operações de combate à poluição do mar.

Do ponto de vista técnico, a capacidade para integrar e processar, pelo menos, o seguinte:

- Informação relativa ao derrame: o tipo de óleo, a quantidade de óleo derramado e o tipo de derrame (instantâneo ou contínuo);
- Informação meteorológica e oceanográfica da área do incidente, através de receção direta e contínua de dados de modelos meteorológicos, pelo menos o vento e agitação marítima;
- Processos de transformação do óleo e da mancha derramada, pelo menos os processos de: evaporação e espalhamento.

Do ponto de vista operacional e funcional, o modelo deve capaz de calcular:

- A previsão de deriva;
- A área da mancha;
- O tempo estimado para atingir a costa;
- A posição estimada de contacto com terra.

Relativamente à apresentação de resultados, é importante considerar os fatores estudados e apurados ao longo da investigação, como a representação cartográfica, sendo que não devem ser dispensadas as seguintes características:

- Utilização de carta eletrónica;
- Representação da trajetória de deriva
- Identificação de pontos e zonas sensíveis, como as zonas protegidas e as zonas turísticas;

As ferramentas SIG são uma ótima opção para este tipo de modelos, tendo a capacidade de compilar a informação por camada e apresentá-la de acordo com as necessidades do utilizador.

Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações

6.1 Análise sumária do trabalho realizado e trabalhos futuros

Face ao trabalho efetuado, considera-se que os objetivos propostos foram, na sua maioria, alcançados de forma satisfatória. Considera-se, ainda, que as questões de investigação levantadas foram adequadas e pertinentes ao desenvolvimento da presente dissertação, permitindo reunir informação que contribuiu para alcançar o objetivo principal da investigação.

As questões de investigação derivadas foram trabalhadas ao longo de toda da dissertação:

1. Quais as problemáticas envolvidas na modelação de derrames de HC?

No início do desenvolvimento da presente dissertação, a análise e estudo dos HC e as suas características foram o primeiro objeto de estudo. Esse estudo, permitiu aprofundar os conhecimentos sobre a matéria, as suas características e processos de transformação, com referência ao contexto operacional. Esta fase mostrou-se fundamental para consolidar a assimilação das relações entre as características e os processos de transformação decorrentes de um derrame.

Uma particularidade na modelação de derrames de HC são as variantes associadas ao óleo. O facto de se tratar de uma substância no estado líquido, que implica uma forma física variável e inconstante, e de as suas diversas características (densidade, viscosidade, ponto de inflamação, solubilidade, etc.) serem todas influenciadora e condicionadoras dos processos de modelação.

2. Quais as particularidades da modelação de derrames de HC?

Seguidamente, foi aprofundada a temática da modelação de derrames de HC. Desta vez, com o objetivo de estudar e analisar a integração dos processos de transformação do óleo nas formulações e modelações utilizadas e de apresentar o estado da arte dos modelos operacionais de referência na modelação de derrames de HC. Permitindo aferir a complexidade da modelação e reunir os conhecimentos e os termos de análise para enquadramento do modelo do IH, no âmbito do objetivo da dissertação.

As exigências da modelação de derrames de HC não devem ser descoradas. A influência dos fatores meteo-oceanográficos, e consequentes processos de transformação (evaporação, espalhamento, emulsificação, etc.) são fatores decisivos e preponderantes no movimento e deriva sofridos pela mancha. No processo de modelação de HC é fundamental que estes processos sejam considerados e que os incluam nos modelos e formulações.

3. Qual a habilitação do modelo de previsão de deriva superficial do IH no contexto da modelação de derrames de HC?

Neste âmbito, foi conduzida uma análise detalhada ao modelo do IH, orientada a diferentes categorias, averiguando as origens, as metodologias e formulações utilizadas, em intersecção com todo o conhecimento adquirido ao longo estudo anteriormente desenvolvido. Sendo de salientar a comparação do modelo com os modelos operacionais de referência apresentados, de onde resultou a identificação de diversas lacunas e limitações na aplicabilidade no modelo no âmbito da modelação de derrames de HC.

O modelo é capaz de apresentar uma previsão de deriva, no entanto, no âmbito da modelação de derrames de HC, não incorpora nenhum processo de transformação nem informação do derrame, limitando a viabilidade e realidade de informação disponibilizada.

4. De que forma a apresentação resultados do modelo de deriva superficial do IH satisfazem as necessidades nacionais, no âmbito do combate à poluição do mar por HC?

De modo a reunir informação para responder à questão derivada foi aplicado um questionário a utilizadores dos resultados do modelo do IH, envolvidos na coordenação e condução de ações de combate à poluição no mar. Da análise, concluiu-se que, de um modo geral, o modelo satisfaz as necessidades dos utilizadores, pois é capaz de apresentar uma previsão de deriva, contudo os resultados foram apontados como de difícil interpretação.

5. Como colmatar as suas vulnerabilidade e quais as oportunidades de melhoria do modelo para adaptação ao contexto da modelação de derrames de HC?

Através dos estudos realizados, dos conhecimentos adquiridos ao longo do desenvolvimento da dissertação e do estudo dos resultados da análise detalhada realizada ao modelo, foi possível identificar as vulnerabilidades do modelo e estabelecer propostas de melhoria, incluindo a apresentação de sugestões de intervenções superficiais a curto-prazo e de intervenções profundas a longo-prazo.

A resposta a todas as questões derivadas constituiu uma forma de concluir sobre a questão de investigação principal: - De que forma se enquadra o modelo de previsão de deriva superficial do IH no âmbito da modelação de derrames de HC no mar?

- O modelo de deriva do IH, não se enquadra nas características e padrões de desenvolvimento dos sistemas de modelação de derrames de HC. O modelo do IH encontra-se muito desatualizado e nada adaptado à realidade da modelação de derrames de HC.

Em suma, os resultados obtidos, constituem uma rampa de lançamento para o desenvolvimento e melhoramento do programa de deriva superficial do Instituto Hidrográfico, atendendo aos padrões de desenvolvimento tecnológicos e científicos atuais e às necessidades dos coordenadores nacionais das ações de combate à poluição do mar por hidrocarbonetos.

Bibliografia

- AMN (2017). Consultado em: <http://www.amn.pt/DCPM/PublishingImages/Paginas/Niveis/niveis-de-articulacao.png> , acedido em Maio de 2017.
- _____ (2017). Consultado em: <http://www.amn.pt/DCPM/Paginas/Graus.aspx>, acedido em Maio de 2017.
- _____ (2017). Consultado em: <http://www.amn.pt/DCPM/PublishingImages/Intervinientes%20dispositivo%20territorial.jpg> , acedido em Maio de 2017.
- _____ (2017). Consultado em: http://www.amn.pt/DCPM/PublishingImages/Organograma%20Tomada%20de%20Decis%C3%A3o_IncidentePolui%C3%A7%C3%A3o%20PML.jpg , acedido em Maio de 2017.
- ASA-RPS (2017). Consultado em: <http://asascience.com/>, acedido em Abril de 2017.
- _____ (2017). Consultado em: <http://rps-asa.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=516b8108b16048569d4d262ff7a12639>, acedido em Maio de 2017.
- AZEVEDO, A. (2010). *Sistema integrado de modelação para apoio à prevenção e mitigação de acidentes de hidrocarbonetos em estuários e orla costeira*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.
- BREIVIK, O. *et al* (2012). *BAKTRAK: Backtracking drifting objects using a interative algorithm with a forward trajectory model*. *Ocean Dynamics Journal*, Volume 62, Número 2, pp. 239-252.
- CUNHA, T. P. (2004). *A importância Estratégica do Mar para Portugal*. Publicação Nação e Defesa. Nº 108, 2ª Série, pp. 41-5.
- DGAM (s.d.), *Discussão Pública sobre a Estratégia Nacional para o Mar 2013-2020*, in <http://www.dgpm.mam.gov.pt/Pages/ENM.aspx>, consultado em janeiro de 2017

- _____ (2011), *MTAMN 1 (A) - Guia de apoio ao combate à poluição do mar por hidrocarbonetos e outras substâncias perigosas*.
- _____ (2017). Consultado em: <https://www.dgpm.mm.gov.pt/acordo-lisboa>, acessado em Abril 2017.
- ETKIN, D. S. (2015). *Risk analysis and prevention*. In M. Fingas (Ed.), *Handbook of oil spill science and technology* (pp. 33-65). New Jersey, NJ: John Wiley & Sons.
- EZEQUIEL, M. et al (2003). *O papel do Instituto Hidrográfico no acompanhamento e previsão da deriva do fuel derramado pelo navio "Prestige"*. Anais do Instituto Hidrográfico. Nº 16 (2002-2003), pp. 7-11.
- FAY, J. (1971). *Physical processes in the spread of oil on water surface*. Washington, DC, American Petroleum Institute.
- FINGAS, M. (2001). *The Basics of Oil Spill Cleanup*. (2ª Edição). Canadá: Jennifer Charles.
- _____ (2015). *Introduction to oil chemistry and properties*. In M. Fingas (Ed.), *Handbook of oil spill science and technology* (pp. 83 - 121). New Jersey, NJ: John Wiley & Sons. Publicado por John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey. Publicado simultaneamente no Canadá. ISBN 978-0-470-45551-7
- _____ (2015). *Introduction to spill modeling*. In M. Fingas (Ed.), *Handbook of oil spill science and technology* (pp. 287 - 300). New Jersey, NJ: John Wiley & Sons. Publicado por John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey. Publicado simultaneamente no Canadá. ISBN 978-0-470-45551-7.
- FINGAS, M. e FIELDHOUSE, B. (2015). *Water-in-oil emulsions: Formation and prediction*. In M. Fingas (Ed.), *Handbook of oil spill science and technology* (pp. 225 - 270). New Jersey, NJ: John Wiley & Sons. Publicado por John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey. Publicado simultaneamente no Canadá. ISBN 978-0-470-45551-7.

- GOVERNO DE PORTUGAL (s.d.), *Estratégia Nacional para o Mar 2013-2020*. Consultado em: http://issuu.com/dgpm_portugal/docs/enm213_2020, acedido em novembro de 2016.
- HACKETT, B. *et al* (2006), *Forecasting the drift of objects and substances in the ocean*. In E.P. Chassingnet, Jacques Verron (Eds.). *Ocean Weather Forecasting* (Chap. 23, pp. 507-523). Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway
- HOLLEBONE, B. (2015). *Oil physical properties: measurement and correlation*. In M. Fingas (Ed.), *Handbook of oil spill science and technology* (pp. 69-80). New Jersey, NJ: John Wiley & Sons. Publicado por John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey. Publicado simultaneamente no Canadá. ISBN 978-0-470-45551-7.
- IEA (2016). *Worldwide primary energy supply in 2014*. Consultado em: <https://www.statista.com/statistics/270528/global-energy-supply-by-source/>, acedido em Abril 2017.
- INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (2016), *Energy Policies of IEA Countries – Portugal – 2016 Review*, in https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Energy_Policies_of_IEA_Countries_Portugal_2016_Review.pdf, consultado em janeiro de 2017
- _____ (2016a), *Oil informatios 2016*, in <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1920537974>, consultado em janeiro de 2016
- LIN, Q. (2015). *Oil spill impact and recovery of coastal marsh vegetation*. In M. Fingas (Ed.), *Handbook of oil spill science and technology* (pp. 477-484). New Jersey, NJ: John Wiley & Sons. Publicado por John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey. Publicado simultaneamente no Canadá. ISBN 978-0-470-45551-7.
- MARINHA PORTUGUESA (2016), *Portugal uma Nação Marítima*, in <http://www.marinha.pt/pt-pt/historia-estrategia/portugal-nacao->

maritima/Paginas/Portugal-Nacao-Maritima.aspx, consultado em dezembro de 2016

MARPOCS (2017). Consultado em: <http://marpocs.eu/actors-beneficiaries/>,
acedido em Abril 2017

_____ (2017). Consultado em: [http://marpocs.actionmodulers.com/
maps/maps1.shtml](http://marpocs.actionmodulers.com/maps/maps1.shtml), acedido em Maio de 2017.

MOHID (2017). Consultado em: [http://www.mohid.com/pages/
models/
mohidwater/mohid_water_home.shtml](http://www.mohid.com/pages/models/mohidwater/mohid_water_home.shtml), acedido em Abril 2017.

NOAA (s.d.). *What is the biggest source of pollution in the ocean?*. Consultado em:
<http://oceanservice.noaa.gov/facts/pollution.html>, acedido em fevereiro
de 2017.

_____ (2017). Consultado em: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/pollution.html>,
acedido em Abril 2017.

_____ (2017). Consultado em: [http://response.restoration.noaa.gov/oil-and-
chemical-spills/oil-spills/spill-containment-methods.html](http://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/spill-containment-methods.html), acedido em
Janeiro de 2017.

OILMAP (2017). Consultado em: <http://asascience.com/software/oilmap/>Erro! A
referência da hiperligação não é válida., acedido em Maio de 2017.

SANTO, C. (2000). *Proteção das zonas costeiras contra a poluição por hidrocarbonetos*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

SINTEF (2017). Consultado em: <https://www.sintef.no/en/software/oscar/>,
acedido em Abril 2017.

_____ (2017). Consultado em: <https://www.sintef.no/en/>, acedido em Abril 2017.

THURMAN, T. (2010). *Essentials of Oceanography*. Upper Saddle River, NJ, Pearson Prentice Hall.

WORLDPRESS (2015). Afundamento do navio mercante "Prestige". Consultado em:
<https://portalgaia.wordpress.com/2015/04/22/derrame-do-prestige-2002/>,
acedido em Maio de 2017.

Legislação Consultada

REPÚBLICA PORTUGUESA, Ministério da Defesa Nacional, Decreto-Lei 185/2014,
Diário da República, I Série, 29 de dezembro de 2014.

_____. Ministério da Defesa Nacional, Resolução do Conselho de Ministros nº
25/93, Diário da República, I Série-A, 14 de outubro 1997.

_____. Ministério da Defesa Nacional, Resolução da Assembleia da República nº60-
B/97, Diário da República n.º 88/1993, Série I-B, 15 de abril de 1993.

Apêndice

Apêndice 1 - Questionário on-line

Anexo

Anexo A - Exemplar do relatório do *CleanSeaNet*